UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

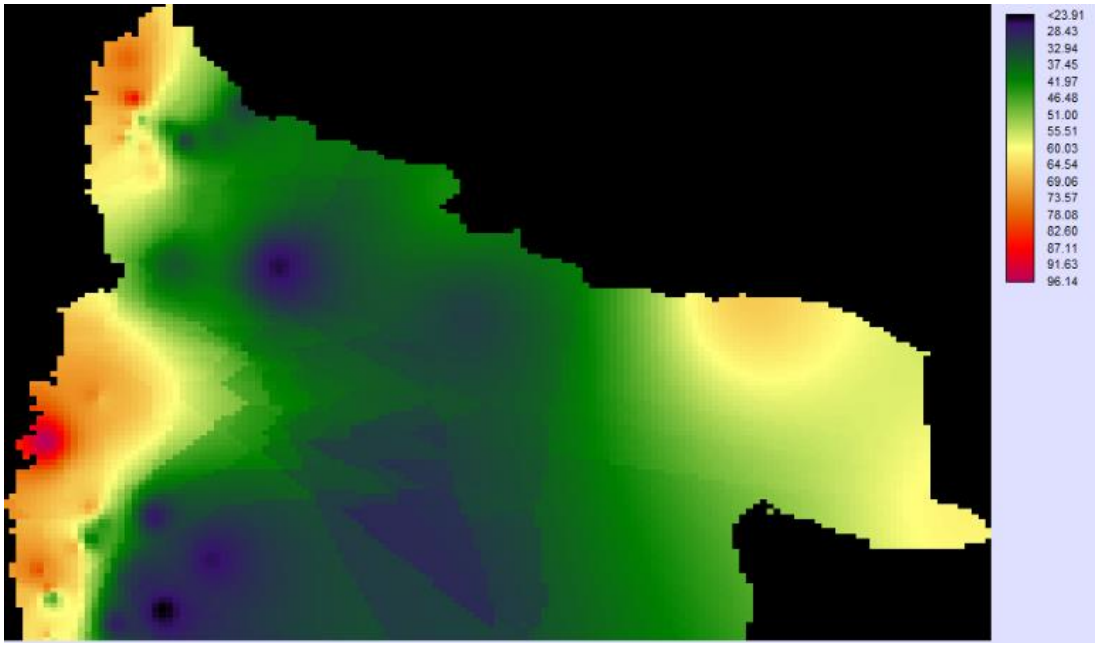
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

CENTRO DE ESTUDIOS Y TECNOLOGÍA DEL AGUA

PRACTICA SUPERVISADA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

"REGIONALIZACIÓN DE LLUVIAS MÁXIMAS DIARIAS EN LAS PROVINCIAS DE NEUQUEN Y RIO NEGRO"



AUTOR: PIAZZONI. GINO LUIS

TUTOR INTERNO: DR. ING. GARCÍA, CARLOS MARCELO.

SUPERVISOR EXTERNO: ING. GUILLÉN, NICOLÁS FEDERICO.

- AÑO 2017 -

AGRADECIMIENTOS

- A mi familia de Neuquén y de Colonia Caroya, por ser el pilar fundamental en mi vida, por su apoyo y cariño incondicional; en especial a mis Padres Miguel y Gladys por enseñarme los valores correctos, por aconsejarme en todo momento, por brindarme la oportunidad de construir mi futuro, y lo más importante, por permitirme venir a estudiar a Córdoba.

- A mis dos abuelas por acompañarme durante mi carrera. Muy agradecido de que una de ellas esté hoy en este momento.

- A mis amigos, los de toda la vida y los que conocí en esta gran ciudad. Gracias a sus consejos y acompañamiento.

- A Nicolás, supervisor externo, quien me guió a lo largo de toda la práctica supervisada; sin su ayuda, enseñanza y paciencia este trabajo no podría haber sido posible.

- Al Dr. Ing. Carlos García, por su aporte de experiencia en la materia, una gran admiración y respeto hacia él.

- A los docentes de esta casa de estudios, que ayudaron en mi formación como ingeniero, por su dedicación en la enseñanza.

TÍTULO: REGIONALIZACIÓN DE LLUVIAS MÁXIMAS DIARIAS EN LA PROVINCIAS DE NEUQUEN Y RIO NEGRO.

Palabras Claves: *Precipitación Máxima Diaria Anual, Regionalización, Sistemas de Información Geográfica, Periodo de Retorno.*

RESUMEN

El presente trabajo se desarrolló dentro del grupo de investigación en el Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, con el fin de generar herramientas para estimar el valor de la lámina de lluvia para diseño hidrológico en las provincias de Neuquén y Rio Negro. Teniendo en cuenta que para predecir esta lámina de lluvia para distintas duraciones, se necesitan registros continuos que se obtienen con *pluviografía,* y que los mismos son escasos espacialmente y deficiente en lo que hace a la extensión de las series históricas, se recurre a la información *pluviométrica* habitualmente disponible. Esta información de lámina de lluvia precipitada diaria es el punto de partida para que luego, con técnicas apropiadas, se estimen lluvias extremas de duración menor, asociadas a un periodo de retorno. Sobre esta base, se realiza un proceso de regionalización del valor de la lámina de lluvia diaria estimada para distintas probabilidades de excedencia, cuyo principal objetivo es aprovechar los datos registrados en distintos lugares, y generar mapas digitales para la zona de estudio.

En primer lugar, se seleccionaron registros de un conjunto de estaciones pluviométricas. A partir de esta información se elaboraron las series históricas de máximos diarios anuales. Luego se verificó que las series elaboradas cumplan las hipótesis estadísticas básicas requeridas para hacer un análisis de estadística inferencial (presencia de datos atípicos, independencia, estacionariedad y homogeneidad). Luego se realizaron 6 ajustes de funciones de distribución de probabilidad para estimar los valores de máxima lámina de lluvia para los siguientes periodos de retorno, T= 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años, como así también los valores de los intervalos de confianza. Se seleccionó la función de distribución *LogNormal* como óptima para este estudio y se estimaron los valores de lámina de lluvia máxima diaria para distintas probabilidades de excedencia. Dichos valores de lámina de lluvia diaria se regionalizaron para las provincias de Neuquén y Rio Negro mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (Idrisi Selva 17.00), el cual permite generar mapas digitalizados con una resolución espacial de 25 [km^2]. Finalmente, se acoplarán los datos de las dos provincias analizadas en este trabajo con las demás previamente desarrolladas siguiendo la misma metodología para ir conformando el mapa nacional de precipitaciones máximas diarias asociadas a diferentes recurrencias.

INDICE

1. MARCO REFERENCIAL. 12
1.1. INTRODUCCIÓN. 12
1.1.1. Antecedentes de estudios sobre lluvias máximas diarias para diseño hidrológico en Argentina. 13
1.2. DESCRIPCIÓN DE LAS PROVINCIAS ANALIZADAS EN ESTE ESTUDIO .. 16
1.2.1. Provincia de Neuquén. 16
1.2.2. Provincia de Río Negro 19
1.3. OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA. 21
1.3.1. Objetivo General. 21
1.3.2. Objetivos Particulares. 21
1.4. METODOLOGÍA. 22
2. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE ESTADÍSTICA HIDROLÓGICA. 23
2.1. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA. 23
2.2. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS BÁSICAS EN LAS SERIES HISTÓRICAS. 24
2.2.1. Detección de datos atípicos en la serie. 25
2.2.2. Prueba de Independencia (Wald-Wolfowitz). 26
2.2.3. Prueba de Estacionariedad (Kendall). 27
2.2.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual (Wilcoxon). 28
2.3. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL. 30
2.3.1. Función de distribución de probabilidad empírica. 30
2.3.2. Ajuste de la función de distribución de probabilidad. 30
2.3.2.1. Ajuste por el Método de Momentos. 30
2.3.2.2. Ajuste por el Método de Máxima Verosimilitud. 31
2.3.3. Estimación de los valores máximos para distintos periodos de retorno. 32
3. INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA ANALIZADA. 35
3.1. RECOPILACIÓN DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICA HISTÓRICA. 35
3.2. LOCALIZACIÓN ESPACIAL DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS SELECCIONADAS. 35
3.3. SELECCIÓN DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS. 37
4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO COMPLETO DE LOS REGISTROS DE UNA SERIE SELECCIONADA. 39
4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS REGISTROS A ANALIZAR. 39
4.2. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA. 41
4.3. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS EN LAS SERIES DE MÁXIMOS HIDROLÓGICOS. 45
4.3.1. Detección de datos atípicos. 45
4.3.2. Prueba de Independencia. 47
4.3.3. Prueba de Estacionariedad. 48
4.3.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual. 48

4.4. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL. 50
4.4.1. Ajuste de función de distribución de probabilidad. 50
4.4.2. Contraste entre los valores de lluvia máxima estimadas con distintas funciones de distribución y métodos de ajuste. 60
4.4.3. Contraste entre las distintas funciones de ajuste por Métodos de Momentos y Método de Máxima Verosimilitud. 61
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA EL CONJUNTO DE ESTACIONES SELECCIONADAS. 63
5.1. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS EN LAS SERIES DE LLUVIAS MÁXIMAS. 63
5.1.1. Detección de presencia de Datos Atípicos. 63
5.1.2. Prueba de Independencia. 63
5.1.3. Prueba de Estacionariedad. 64
5.1.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual. 64
5.1.5. Contraste entre los valores de lluvia máxima estimadas con distintas funciones de distribución y métodos de ajuste para 100 años de periodo de retorno con respecto a la Distribución Log Normal. 65
5.2. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA. 67
5.3. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL. 68
6. REGIONALIZACION. 70
6.1. INTRODUCCION. 70
6.2. CREACION DE UNA BASE DE DATOS. 70
6.3. CREACION DE ARCHIVO VECTORIAL Y DE VALORES 72
6.4. GENERACION DE UNA MASCARA PARA DELIMITAR LA ZONA DE INTERPOLACION 75
6.5. METODO DE INTERPOLACION DE KRIGING 78
6.6. METODO DE ANALISIS TENDENCIAL 81
6.6.1. Creación de Superficies Tendenciales. 82
6.6.2. Histograma de frecuencias. 86
6.7. MAPAS TENDENCIALES DE LLUVIAS DIARIAS MAXIMAS ANUALES PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO. 94
7. Análisis de los Resultados Obtenidos 98
7.1. INTRODUCCIÓN 98
7.2. CONTRASTE ENTRE LOS MAPAS OBTENIDOS Y MAPAS DE ISOHIETAS MEDIAS ANUALES EXISTENTES EN LAS PROVINCIAS DE ESTUDIO 98
7.2.1. ANTECEDENTES 98
7.2.2. COMPARACION ENTRE MAPAS OBTENIDOS EN ESTE TRABAJO Y MAPAS DE ISOHIETAS DE LAS PROVINCIAS DE ESTUDIO 100
7.3. COMPARACIÓN DE MAPAS GENERADOS CON MAPA DE PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL 102
8. CONCLUSIONES. 107
8.1. CONCLUSIONES DEL TRABAJO. 107

8.2. CONCLUSIONES PERSONALES. 109
8.3. TRABAJOS FUTUROS. 109
9. REFERENCIAS. 111

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Antecedentes de provincias analizadas hasta la actualidad, para una recurrencia de T=100 15
Figura 2: Mapa Político de la Provincia de Neuquén (Fuente: Instituto Geográfico Nacional) 17
Figura 3: Mapa Físico de la Provincia de Neuquén (Fuente: Instituto Geográfico Nacional) 17
Figura 4: Mapa Climático de isohietas anuales e isotermas anuales de la Provincia de Neuquén. (Fuente: Instituto Geográfico Nacional) 18
Figura 5: Mapa Político de la Provincia de Rio Negro (Fuente: Instituto Geográfico Nacional) 20
Figura 6: Mapa Físico de la Provincia de Rio Negro (Fuente: Instituto Geográfico Nacional) 20
Figura 7: Mapa Climático de isohietas anuales e isotermas anuales de la Provincia de Rio Negro. (Fuente: Instituto Geográfico Nacional) 21
Figura 8: Disposición espacial de las estaciones pluviométricas encontradas en la provincia de Neuquén y Rio Negro 35
Figura 9: Longitud de registro de las estaciones pluviométricas de Neuquén y Rio Negro 38
Figura 10: Evolución temporal de los valores máximos anuales de lluvia diaria para la estación de Paso de los Indios en la Provincia de Neuquén. 41
Figura 11: Salida del programa Hyfran para descripción de la estación 42
Figura 12: Determinación, utilizando el programa Hyfran, de probabilidades empíricas de cada dato de lluvia diaria máxima anual utilizando la Ecuación de Weibull para la estación Paso de los Indios en la Provincia de Nenquen (código 18) . 42
Figura 13: Salida de Estadística Base de la estación Paso de los Indios en la Provincia de Neuquén (código 18) 43
Figura 14: Salida del programa Hyfran para la prueba de independencia de la serie de máximos anuales de lluvia diaria de la estación Paso de los Indios en la Provincia de Neuquén (código 18). 47
Figura 15: Salida del programa Hyfran para la prueba de estacionariedad de la serie de máximos anuales de lluvia diaria de la estación Paso de los Indios en la Provincia de Neuquén (código 18) 48
Figura 16: Salida del programa Hyfran para la prueba de homogeneidad a escala anual de la serie de máximos anuales de lluvia diaria de la estación Paso de los Indios en la Provincia de Neuquén (código 18). 49
Figura 17: Captura de pantalla donde se indica la selección de la función de distribución de probabilidad 51
Figura 18: Captura de pantalla donde se indica la selección del método de ajuste de los parámetros de la función de distribución de probabilidad 52
Figura 19: Captura de pantalla donde se indica la inclusión del periodo de retorno T=25 años 52
Figura 20: P (mm) vs Probabilidad de no-excedencia (incluyendo intervalos de confianza) estimada con la función de distribución de probabilidad GEV sobre la base de la región de estudio de la estación Paso de los Indios en la Provincia de Neuquén (código 18)..... 53
Figura 21: Test de adecuación para la función de distribución de probabilidad GEV sobre la base de la región de estudio de la estación Paso de los Indios en la Provincia de Neuquén (código 18). 53

Figura 22: P (mm) vs Probabilidad de no-excedencia (incluyendo intervalos de confianza) estimada con la función de distribución de probabilidad LogNormal sobre la base de la región de estudio de la estación Paso de los Indios de la provincia de Neuquén (código 18) 60
Figura 23: Comparación entre estimaciones realizadas con distintas funciones de distribución de probabilidad y parámetros ajustados con el método de momentos... 62
Figura 24: Comparación entre estimaciones realizadas con distintas funciones de distribución de probabilidad y parámetros ajustados con el método de verosimilitud 62
Figura 25: Evolución de la máxima diferencia porcentual entre los valores estimados con la distribución LogNormal y alguna función de distribución a medida que aumenta la longitud de la serie para las estaciones analizadas hasta la actualidad. ... 65
Figura 26: Máxima diferencia porcentual entre el valor de lluvia del método Lognormal y el valor proporcionado por el método que más se aleja de esta función versus la dispersión porcentual del método Lognormal para T=100 años 66
Figura 27: Estaciones finalmente seleccionadas de Neuquén y Rio Negro..... 69
Figura 28: Cuadro de diálogo DatabaseWorkshop 71
Figura 29: Cuadro de diálogo DatabaseWorkshop – Import..... 71
Figura 30: Cuadro de Diálogo Database Workshop – Export..... 73
Figura 31: Mapa con la localización de las estaciones en las provincias de Neuquén y Rio Negro 73
Figura 32: Cuadro de Diálogo Export Vector File. 74
Figura 33: Cuadro de Diálogo de Establish a Display Link..... 74
Figura 34: Cuadro de Diálogo Export Vector File..... 74
Figura 35: Mapa con la localización y valores de lluvias máximas diarias para T= 2 años, en las provincias de Neuquén y Rio Negro..... 75
Figura 36: Cuadro de dialogo Import Dxf IDRISI. 76
Figura 37: Cuadro de dialogo DXF / Idrisi conversión module..... 76
Figura 38: Cuadro de dialogo DXF / Idrisi conversión module..... 77
Figura 39: Cuadro de diálogo RASTERVECTOR..... 77
Figura 40: Cuadro de dialogo Raster / Vector Conversión..... 77
Figura 41: Mascara utilizada para las Provincias de Neuquén y Rio Negro..... 78
Figura 42: Secuencia para abrir el método de interpolación Kriging and Simulation . 80
Figura 43: Cuadro de Diálogo Kriging and Simulation 80
Figura 44: Raster interpolado por el método Kriging para PMD2 (Precipitación media máxima estimada para un período de retorno de dos años) 81
Figura 45: Secuencia para abrir el método de interpolación Trend..... 83
Figura 46: Cuadro de diálogo del método de interpolación Trend..... 83
Figura 47: Superficie tendencial. Regresión Lineal. T = 2 Años 84
Figura 48: Secuencia para abrir la función “Overlay”. 84
Figura 49: Cuadro de diálogo de la función Overlay 85
Figura 50: Esquema de la operación OVERLAY (multiplicación) 85
Figura 51: Grilla interpolado por el método Trend. T = 2 Años Media de las series históricas de las lluvias máximas diarias anuales..... 86
Figura 52: Esquema donde los valores de lluvias diarias máximas medias quedan dentro del intervalo de confianza. 87
Figura 53: Esquema donde los valores de lluvias diarias máximas medias quedan fuera del intervalo de confianza. (Se presenta subestimación) 87
Figura 54: Esquema donde los valores de lluvias diarias máximas medias quedan fuera del intervalo de confianza. (Se presenta sobrestimación)..... 87

Figura 55: Cuadro de dialogo de la función Overlay 88
Figura 56: Diferencia entre "Kriging" (valores mínimos) y "Trend" (regresión lineal) [mm]. T = 2 Años 88
Figura 57: Secuencia para abrir la función Histo 89
Figura 58: Cuadro de diálogo de la función Histo. 90
Figura 59: Histograma numérico de frecuencias. Producción numérica 90
Figura 60: Histograma de frecuencias min-trend para un periodo de retorno de 2 años. Producción gráfica..... 91
Figura 61: Histograma de frecuencias max-trend para un periodo de retorno de 2 años. Producción gráfica..... 92
Figura 62: Diferencia porcentual ente valores medios y extremos. 93
Figura 63: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Neuquén y Rio Negro para un Periodo de retorno T= 2 años [mm]. 94
Figura 64: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Neuquén y Rio Negro para un Periodo de retorno T= 5 años [mm] 94
Figura 65: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Neuquén y Rio Negro para un Periodo de retorno T= 10 años [mm]. 95
Figura 66: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Neuquén y Rio Negro para un Periodo de retorno T= 20 años [mm]. 95
Figura 67: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Neuquén y Rio Negro para un Periodo de retorno T= 25 años [mm]. 96
Figura 68: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Neuquén y Rio Negro para un Periodo de retorno T= 50 años [mm]. 96
Figura 69: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Neuquén y Rio Negro para un Periodo de retorno T= 100 años [mm]..... 97
Figura 70: Mapa de isohietas de precipitaciones medias anuales de la provincia de Neuquén. 99
Figura 71: Mapa de isohietas de precipitaciones medias anuales de la provincia de Rio Negro. 99
Figura 72: Mapa de isohietas de precipitaciones máximas diarias obtenidas por el método Kriging estimada para un período de retorno de 25 años..... 100
Figura 73: Mapa de isohietas de precipitaciones máximas diarias obtenidas por el ajuste de superficies tendenciales para un periodo de retorno de 25 años 101
Figura 74: Mapa de lluvias diarias máximas anuales de las provincias analizadas previamente a la realización de este trabajo para un Periodo de retorno T= 25 años [mm]..... 103
Figura 75: Mapa de lluvias diarias máximas anuales de las provincia de Neuquén y Rio Negro para un Periodo de retorno T= 25 años [mm] 104
Figura 76: Lluvia media anual en la República Argentina (FUENTE: INTA). 105

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores Kn para la prueba de datos atípicos 25
Tabla 2: Valores de Kcri para el test de Kendall 28
Tabla 3: Periodos de retorno en años utilizados para el diseño de estructuras de control de agua (Chow, 1994) 34
Tabla 4: Estaciones pluviométricas seleccionadas de Neuquén y Rio Negro 36
Tabla 5: Porcentajes de las estaciones pluviométricas de Neuquén y Rio Negro en función de su longitud de serie 37
Tabla 6: Planilla de lluvias diarias máximas anuales de la estación Paso de los Indios en la Provincia de Neuquén 40
Tabla 7: Probabilidad empírica de la no excedencia de cada dato de lluvia diaria máxima anual para la estación Paso de los Indios en la Provincia de Neuquén (código 18) 44
Tabla 8: Planilla resumen de datos pluviométricos 46
Tabla 9: Estimación de láminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad GEV (parámetros estimados por el método de momentos) sobre los registros de 68 años de la estación Paso de los Indios de la provincia de Neuquén (código 18) 54
Tabla 10: Estimación de láminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad GEV (parámetros estimados por el método de momentos) sobre los registros de 68 años de la estación Paso de los Indios de la provincia de Neuquén (código 18) 55
Tabla 11: Estimación de láminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad Log-Pearson tipo III (parámetros estimados por el método de momentos) sobre los registros de 68 años de la estación Paso de los Indios de la provincia de Neuquén (código 18). 56
Tabla 12: Estimación de láminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad GEV (parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud) sobre los registros de 68 años de la estación Paso de los Indios de la provincia de Neuquén (código 18). 57
Tabla 13: Estimación de láminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad Gumbel (parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud) sobre los registros de 68 años de la estación Paso de los Indios de la provincia de Neuquén (código 18). 58
Tabla 14: Estimación de láminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad LogNormal (parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud) sobre los registros de 68 años de la estación Paso de los Indios de la provincia de Neuquén (código 18). 59
Tabla 15: Contraste entre los valores de lluvia máxima estimadas con distintas funciones de distribución y métodos de ajuste 61

Tabla 16: Contraste relativo de los distintos valores estimados con distintas funciones de distribución (con respecto a los valores estimados con la función de distribución LogNormal)..... 61
Tabla 17: Estación Pluviométrica que no verificó la Prueba de Independencia de sus valores máximos diarios de Rio Negro..... 63
Tabla 18: Estación Pluviométrica que no verifico la Prueba de Estacionariedad de sus valores máximos diarios de Rio Negro..... 64
Tabla 19: Estaciones Pluviométricas que no verificaron la Prueba de Homogeneidad de sus valores máximos diarios de Rio Negro. 64
Tabla 20: Datos de estadística descriptiva de las series de lluvias diarias máximas anuales finalmente seleccionadas de Neuquén y Rio Negro 67
Tabla 21: Valores de lluvias máximas diarias (PMD) estimadas para distintos períodos T (2, 5, 10, 20, 25, 50, 100) para las estaciones finalmente seleccionadas de Neuquén y Rio Negro 68
Tabla 22: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 2 Años. 92
Tabla 23: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 5 Años. 92
Tabla 24: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 10 Años..... 92
Tabla 25: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 20 Años..... 93
Tabla 26: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 25 Años..... 93
Tabla 27: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 50 Años..... 93
Tabla 28: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 100 Años. 93

1. MARCO REFERENCIAL.

1.1. INTRODUCCIÓN.

Desde el punto de vista humano, el agua tiene un impacto positivo si se la considera como recurso hídrico y se tienen en cuenta los efectos benéficos, como son su uso doméstico, industrial, agrícola, minero, recreativo, entre otros. Mientras que, también se puede tener un impacto negativo si se habla de los fenómenos como amenazas hídricas; tal es el caso de los efectos nocivos producidos sobre seres vivos, suelos, infraestructura, seguridad, tránsito, etc.

Dentro de estos efectos nocivos se busca prevenir un desastre, el cual será todo evento o suceso, que generalmente ocurre de manera repentina e inesperada, provocando daños severos a una colectividad, región o país. Los desastres van a responder a amenazas, y evaluar las mismas implica pronosticar o predecir la ocurrencia y magnitud del fenómeno, con referencia en el mecanismo generador y el monitoreo y/o registro de eventos en el tiempo.

Cuando se pronostica se determina un monto y tiempo de ocurrencia breve (dadas las incertidumbres) para el suceso. Es decir que el pronóstico es un anticipo de lo que va a ocurrir, para poder avisar a la población amenazada sobre el fenómeno peligroso. En resumen, los modelos de pronóstico constituyen sistemas de alerta y se utilizan en situaciones de emergencia.

En cambio, en lo que respecta a la predicción, la misma no determina cuándo se producirá el evento hipotético, sino cuál será la magnitud del mismo, en función de su duración y recurrencia (con base en información probabilística); o bien, en el largo plazo, cuál será el evento máximo probable. Se asume que ocurrirá en algún momento de un período plurianual, relacionado con la planificación y dimensionamiento de obras en el área potencialmente afectable, con lo que resulta desacertado asignarle fecha u hora. En este ámbito de la predicción está incluido el tema de lluvias para diseño hidrológico.

“El diseño hidrológico se define como la evaluación del impacto de los procesos hidrológicos y la estimación de valores de las variables relevantes para modificarlo”

La variable más relevante y requerida es el caudal, “Q”; que se predice con una estimación estadística, considerando la estacionariedad del fenómeno, y usando datos históricos, con una longitud de serie suficiente. Con esto se asegura que una muestra sea larga y representativa, con lo que se tendrá menos incertidumbre.

Lamentablemente los registros históricos de caudal no son habituales en Argentina, por ello se recurre a la información de lluvia, proceso físico generador del escurrimiento, y modelos de transformación lluvia-caudal.

Con la información de lluvias, para predecir la lámina para distintas duraciones se necesitan registros continuos (pluviografía), y como la misma es escasa espacialmente y deficiente en lo que hace a la extensión de las series históricas, se recurre a la información pluviométrica habitualmente disponible. La misma es el punto de partida para que luego, con técnicas apropiadas, se estimen lluvias extremas de duración menor, asociadas a un periodo de retorno. Sobre esta base, se realiza un proceso de regionalización de la información pluviométrica, cuyo principal objetivo es aprovechar los datos registrados en distintos lugares, y generar mapas digitales para la zona de estudio.

1.1.1. Antecedentes de estudios sobre lluvias máximas diarias para diseño hidrológico en Argentina.

En primer lugar y dado su carácter precursor en la temática se cita el trabajo elaborado por el Ing. Ruhle (1967), el cual ha sido desde su publicación ampliamente utilizado por los profesionales viales del país para determinar el caudal de diseño para infraestructura hídrica basándose en una serie de ábacos o gráficos. Entre los ábacos utilizados se encuentra la predicción de la lluvia de diseño utilizando cartografía elaborada para toda la República Argentina.

García (1994), presentó la "Regionalización de Precipitaciones Máximas Diarias en la provincia de Córdoba". Los objetivos del mismo fueron la regionalización de las lluvias máximas diarias para la provincia Córdoba, desarrollando tecnologías para la estimación de lluvias máximas con alcance regional, diseñando un procedimiento expeditivo de estimación para uso ingenieril que aporta herramientas de cálculo particulares para el territorio Provincial. En ese trabajo, cada serie de valores máximos de precipitación fue ordenado por año hidrológico sobre 141 puestos pluviométricos seleccionados en la Provincia, a los cuales se le ajustaron seis distribuciones teóricas de probabilidad: Gumbel, Lognormal, Gamma, Pearson, Normal y Weibull. Se adoptó la Distribución Lognormal como aquella capaz de caracterizar la pluviometría de todo el territorio Provincial. El análisis probabilístico realizado por el autor, determinó los índices estadísticos, la curva de frecuencia muestral y la frecuencia esperada. Mediante el trazado de isohietas por el método de mínima curvatura se obtuvieron coberturas continuas y dichos campos de precipitación fueron plasmados en sendos mapas para 20 períodos de retorno predefinidos (entre 2 a 200 años).

Maidah (2010) retomó el trabajo de García (1994) y bajo el título de "Análisis Espacial de Datos Hidrológicos utilizando Sistemas de Información Geográfica. Aplicación al Estudio de Lluvias Diarias", desarrolló una herramienta técnica actualizada de similares características a la desarrollada en el trabajo de origen, con la ventaja de obtener en forma rápida y expeditiva, mediante las coordenadas geográficas de un punto de interés, las máximas precipitaciones diarias con recurrencia asociada. Los resultados de este trabajo incluyen los valores mínimos, medios y máximos (definidos por los intervalos de confianza) de los valores predichos de la lámina de lluvia máxima diaria para recurrencias de 2, 5, 10, 20, 25, 30, 50, 100 y 200 años en cualquier punto de la Provincia de Córdoba a un nivel de significancia del 95%. Empleando un Sistemas de Información Geográfica (SIG), a través del programa IDRISI Andes, Maidah (2010) presentó raster de isohietas con recurrencias asociadas a partir de información de base que comprendió el periodo 1941-1996, así como un resumen de las principales características del SIG empleado.

Lérida y Sánchez (2011), elaboraron un estudio Metodológico para la determinación de una Grilla i-d-T consistente en la provincia de Córdoba. Este trabajo continuó los lineamientos de Maidah (2009) implementando el Modelo predictor DIT (Caamaño et al., 2003) en toda la provincia de Córdoba, regionalizando las variables hidrometeorológicas que permiten la regionalización de las funciones i-d-T.

Por su parte Bianchiotti (2012) realizó un análisis de la Precipitación Máxima Probable en la provincia de Córdoba a través de un Sistema de Información Geográfica, en el cual se actualizaron datos de estaciones pluviométricas de la base de datos original utilizadas en García (1994) y Maidah (2009) y agregaron nuevas estaciones.

Las publicaciones realizadas por Caamaño, Dasso (2003), y Catalini, Caamaño y Dasso (2011), sintetizan todos los antecedentes mencionados de estudios realizados para la provincia de Córdoba por el grupo de hidrología del Instituto Nacional del Agua y su Centro de Investigación de la Región Semiárida (INA-CIRSA) y el Grupo de Estudios Hidrológicos en Cuencas Pobremente Aforadas de la Universidad Católica de Córdoba (UCC-EHCPA) en lo referente a la predicción de lluvias causales de crecientes de proyecto, comprendiendo su magnitud, su validez a futuro, su transposición y su variación en el tiempo y el espacio e incluye ejemplos de aplicación.

Recientemente, entre los años 2012 y 2013 se realizó un análisis análogo al realizado previamente en la provincia de Córdoba en las provincias de Santa Fe y San Luis (Catalini et al., 2011), lográndose la regionalización de las precipitaciones máximas diarias en estas dos provincias del centro de la Argentina.

Entre los años 2014 y 2015, Guillén continuó aplicando la misma metodología (la de la provincia de Córdoba) en las provincias de Salta, Jujuy, Catamarca, Tucumán, Santiago del Estero, Chaco y Formosa. En dicho trabajo finalmente se agruparon 885 estaciones en base a las cuales se realizaron los mapas de lluvia. Finalmente, en el año 2016, Aldonza y Bonaterra realizaron un trabajo análogo para las provincias de Entre Ríos y Corrientes. A continuación, a modo de ejemplo se muestra el mapa de lluvia (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) obtenido para una recurrencia T = 100.

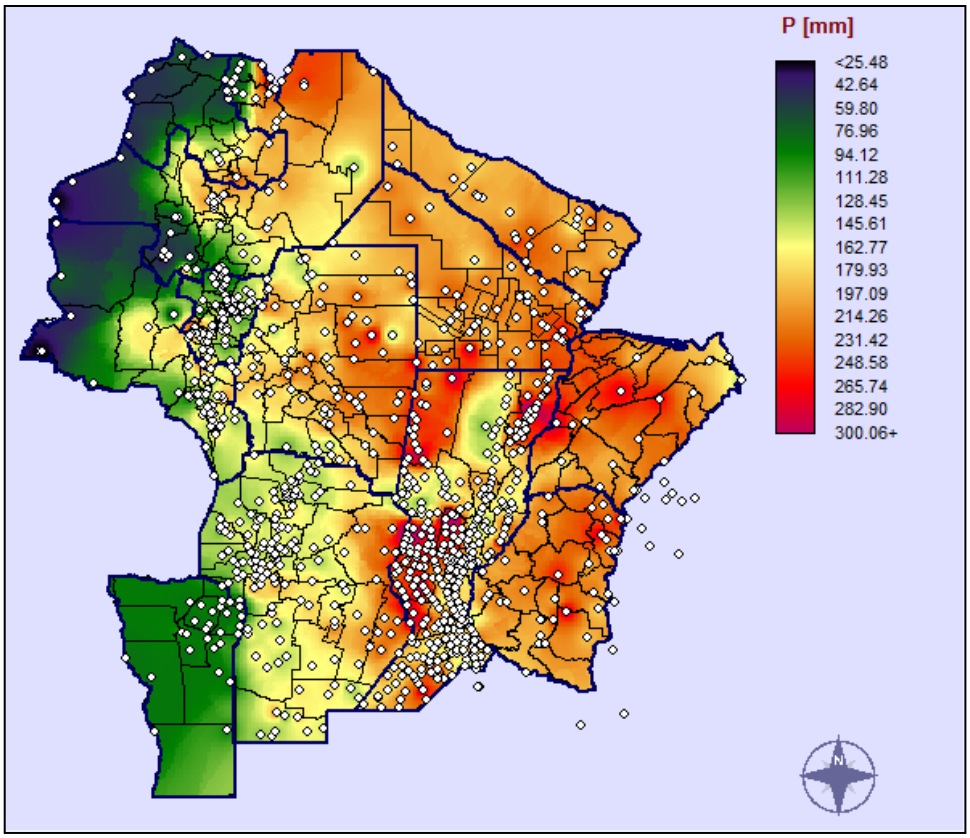


Figura 1: Antecedentes de provincias analizadas hasta la actualidad, para una recurrencia de T=100

1.2. DESCRIPCIÓN DE LAS PROVINCIAS ANALIZADAS EN ESTE ESTUDIO

1.2.1. Provincia de Neuquén

La provincia de Neuquén está situada en la región patagónica de la República Argentina; su capital es Neuquén. Limita al norte con la Provincia de Mendoza; al este con La Pampa y Río Negro; al sur con Río Negro y al oeste con las regiones chilenas del Maule, Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos, de las que es separada por la Cordillera de Los Andes. (Figura 2). Dos grandes ríos forman parte de la cuenca neuquina, el Río Neuquén y el Río Limay, respectivamente. Juntos forman el Río Negro que desemboca en el océano Atlántico. La provincia se encuentra dividida en 16 departamentos.

El Río Negro drena una cuenca de 116.000 km^2, lo que representa un poco más del 4% del total de la superficie continental de la República Argentina. Cubre casi totalmente el territorio de la Provincia de Neuquén y parte del de las de Rio Negro y Buenos Aires.

El Río Negro tiene un módulo de 930 m^3/seg.

El Río Neuquén, con un módulo de 230 m^3/seg, drena un área de 30.000 km^2.

El Río Limay, tiene un módulo de 650 m^3/seg, drena un área de 56.000 km^2.

Respecto al relieve**,** el medio físico provincial presenta un escalonamiento decreciente de oeste a este, provocando que la mayoría de los cursos de agua sigan el mismo rumbo. La cordillera de los Andes cuenta con varios picos importantes, en el norte la altura más alta es la del volcán Domuyo, de 4709 msnm; al sur, el pico más alto es el volcán Lanín, de 3776 msnm (Figura 3).

Figura 2: Mapa Político de la Provincia de Neuquén (Fuente: Instituto Geográfico Nacional)

Figura 3: Mapa Físico de la Provincia de Neuquén (Fuente: Instituto Geográfico Nacional)

Con respecto al clima, es de tipo continental, frío, con estación templada. Si bien los valles de los principales ríos ofrecen zonas muy fértiles (actualmente dedicadas al cultivo: manzanas, peras, entre otras), el sector occidental de la provincia contrasta con el oriental: una franja longitudinal lindera con la Cordillera de los Andes se encuentra recubierta por los bosques fríos perhúmedos antiboreales, llamados bosque andino patagónico y Selva Valdiviana. (Figura 4).

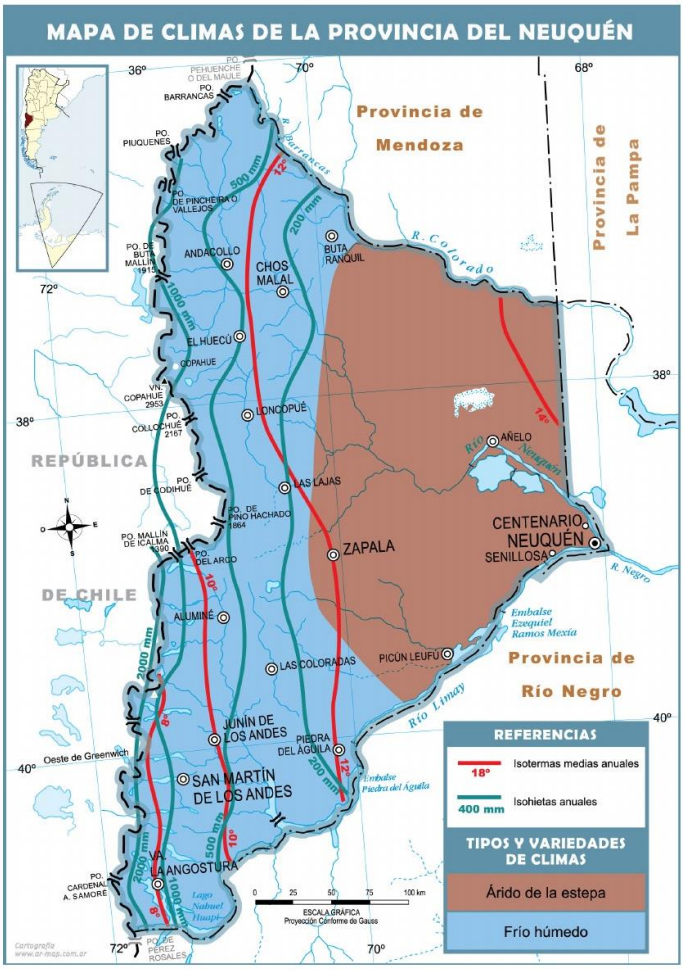


Figura 4: Mapa Climático de isohietas anuales e isotermas anuales de la Provincia de Neuquén. (Fuente: Instituto Geográfico Nacional)

1.2.2. Provincia de Río Negro

Río Negro es una provincia argentina situada en el sur del país, en el norte de la Patagonia. Limita al norte con la provincia de La Pampa, al este con la de Buenos Aires, al sur con Chubut y al oeste con provincia de Neuquén y (separada por la Cordillera de los Andes) con la República de Chile. Territorialmente Río Negro se encuentra dividida en 13 departamentos. (Figura 5).

Respecto al relieve, sus aspectos distintivos son la franja occidental, que corresponde a la zona de la cordillera de los Andes, y una región de mesetas que baja hacia el mar y termina en las costas recortadas típicas de toda la Patagonia.

La zona andina comprende valles transversales, propios de los Andes patagónico-fueguinos, y valles longitudinales al norte, que corresponden a las últimas cadenas de los Andes centrales.

Contrastan en la zona de las mesetas patagónicas las mesetas basálticas altas, como la de Somuncurá, al sur de la provincia, y las mesetas bajas escalonadas que descienden progresivamente en altura, hasta su contacto con el mar. La costa abarca el golfo de san Matías que constituye un importante accidente costero. (Figura 6).

Con respecto al clima, debido a su ubicación geográfica y a su extensión Este-Oeste, Río Negro es una de las provincias argentinas con mayor diversidad geográfica.

La mayor parte del territorio presenta clima templado árido. En la cordillera tiene precipitaciones de 2000 a 3500 mm anuales y en el resto de 200 a 300 mm. El invierno es riguroso, y el verano presenta altas temperaturas, las cuales pueden variar de -25ºC (Maquinchao) hasta poco más de 45ºC (Choele Choel). Predominan los vientos secos del Oeste y Sudoeste.

En la zona de la cordillera prevalece el bosque frío, llamado bosque andino patagónico, con abundancia de coihues y cipreses y maitenes. En las regiones más húmedas predomina la selva valdiviana, que se diferencia del anterior en la presencia de helechos, musgos, enredaderas y epífitas.

En las mesetas, en cambio, la vegetación predominante son los arbustos y pastos duros y bajos. En invierno las nevadas son comunes en toda la región siendo mayores cerca de la Cordillera de los Andes. (Figura 7).

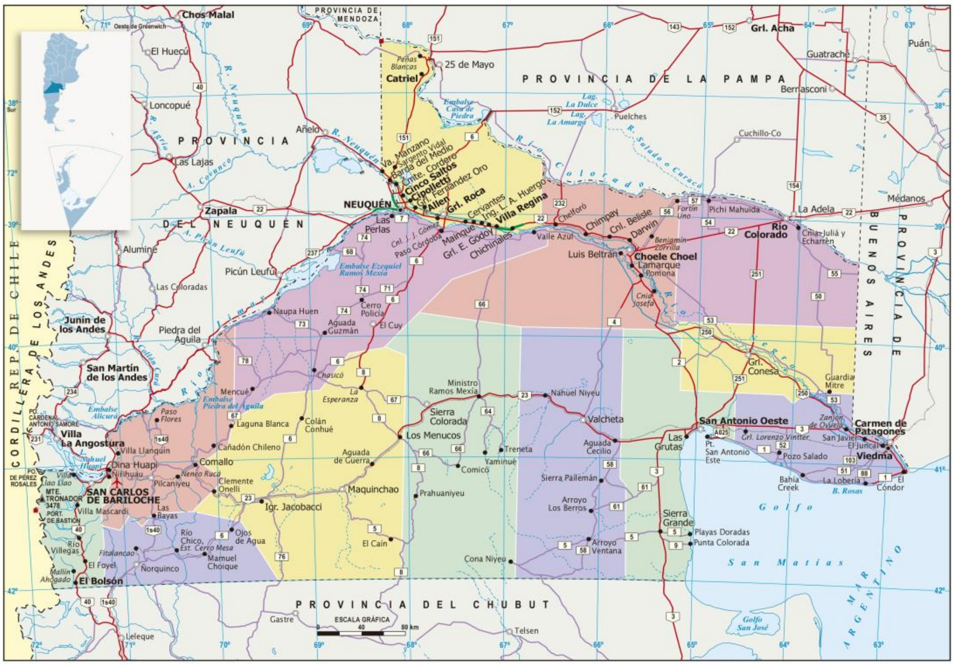


Figura 5: Mapa Político de la Provincia de Rio Negro (Fuente: Instituto Geográfico Nacional)

Figura 6: Mapa Físico de la Provincia de Rio Negro (Fuente: Instituto Geográfico Nacional)

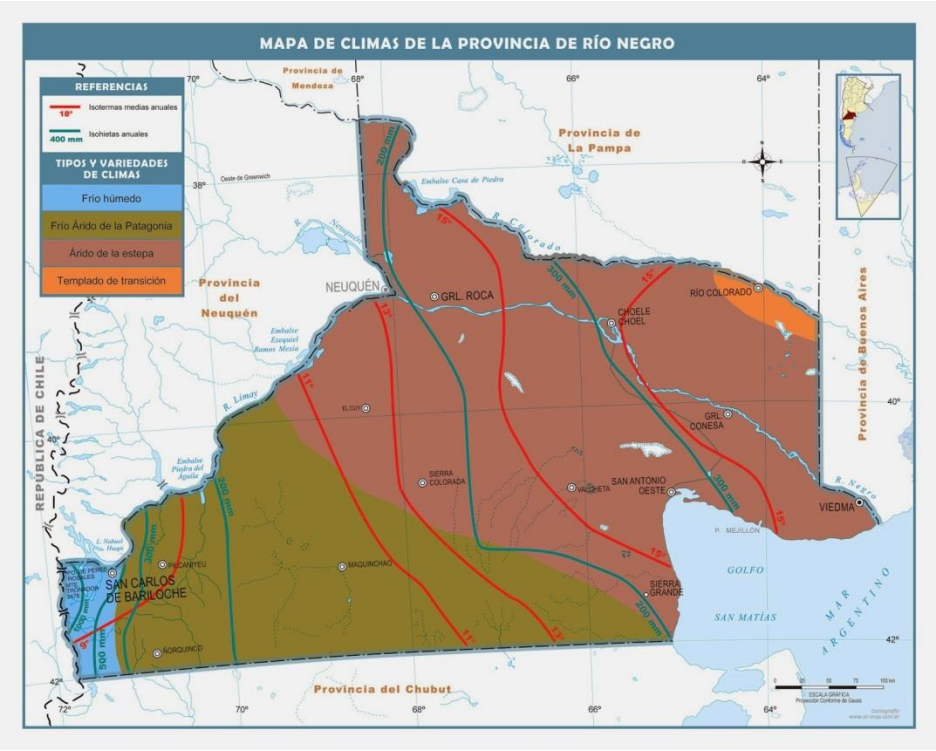


Figura 7: Mapa Climático de isohietas anuales e isotermas anuales de la Provincia de Rio Negro. (Fuente: Instituto Geográfico Nacional)

1.3. OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA.

1.3.1. Objetivo General.

Regionalizar la lluvia máxima diaria en las provincias de Neuquén y Rio Negro.

1.3.2. Objetivos Particulares.

Para cumplir con el objetivo general mencionado anteriormente se definen algunos objetivos específicos:

- Realizar la búsqueda, depuración, esquematización y análisis de los datos pluviométricos existentes en las provincias de Neuquén y Rio Negro.
- Participar en la recopilación, depuración y análisis preliminar de información pluviométrica.
- Entrenamiento en el uso y aplicación de un programa específico para el análisis estadístico (descriptivo e inferencial) de datos.
- Estimar los valores de lluvias máximas diarias para distintos T (períodos de retorno) para los registros seleccionados.
- Generación de un Sistema de Información Geográfica (SIG) utilizando el programa Idrisi Selva 17.00.

- Generación de mapas digitales de lluvias máximas diarias asociadas a distintos T, de resolución espacial 25 [km^2] utilizando el Sistema de Información Geográfico (SIG).

1.4. METODOLOGÍA.

A continuación se detalla de manera resumida la metodología empleada con la finalidad de cumplimentar los objetivos generales y particulares. El proceso se puede resumir en los siguientes puntos:

1. Entrenamiento en el análisis estadístico de series hidrológicas.
2. Recopilación y procesamiento de series pluviométricas de máximos diarios anuales de las distintas estaciones existentes en las provincias de Neuquén y Rio Negro.
3. Ubicación espacial de las distintas estaciones pluviométricas y sus parámetros estadísticos.
4. Determinación del año hidrológico.
5. Generación de la serie hidrológica de máximas lluvias diarias.
6. Verificación de las series históricas de lluvias diarias seleccionadas mediante pruebas estadísticas tales como independencia, estacionariedad y homogeneidad, además de la detección de datos atípicos en las series de precipitación.
7. Determinación de los parámetros provenientes del análisis de estadística descriptiva (media y desvío estándar).
8. Ajuste de distribución de probabilidad.
9. Interpolación de la información puntual, generación de grillas de análisis mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica (Idrisi Selva 17.00).

Las actividades de los puntos 1, 2 están detallados en el capítulo I y II. El punto 3 lo observamos en el capítulo III. El punto 4 y 5 se ven en el capítulo III y IV, el punto 6, 7 y 8 se detallan en el capítulo IV también. Las actividades del punto 9 se realizan en el capítulo VI y el punto 10 se efectúa en el capítulo VII.

A continuación se van a ir desarrollando las actividades expresadas anteriormente.

2. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE ESTADÍSTICA HIDROLÓGICA.

Los procesos hidrológicos evolucionan en el espacio y en el tiempo en una forma que es parcialmente predecible, y parcialmente aleatoria. Este tipo de tratamiento es apropiado para observaciones de eventos hidrológicos extremos, como crecientes o sequías, y para información hidrológica promediada a lo largo de intervalos de tiempo grandes, como la precipitación anual (como es nuestro caso).

Los métodos estadísticos están basados en principios matemáticos que describen la variación aleatoria de un conjunto de observaciones de un proceso hidrológico, y éstos centran su atención en las observaciones mismas en lugar de ver los procesos físicos que las producen. Este capítulo describe estos principios que son los que se aplican en el análisis que se realiza a los registros de lluvias máximas diarias:

2.1. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.

El objetivo de la estadística descriptiva es extraer la información esencial de un conjunto de datos, reduciendo un conjunto grande de números a un conjunto pequeño. Las estadísticas son números calculados de una muestra los cuales resumen sus características más importantes.

Uno de los parámetros estadísticos es el valor esperado E de alguna función de una variable aleatoria. Un parámetro simple es la media μ, el valor esperado de la variable aleatoria. Para una variable aleatoria x, la media es $E(X)$, y se calcula como el producto de χ y la correspondiente densidad de probabilidad $f(x)$, integrado sobre el rango factible de la variable aleatoria:

$$E(X) = \mu = \int_{-\infty}^{\infty} x\, f(x)\, dx$$

Ecuación 1

$E(X)$ es el primer momento alrededor del origen de la variable aleatoria, una medida del punto medio o tendencia central de la distribución. La estimación de la media sobre la base de una muestra es el promedio $\bar{x}$ de la información de la muestra:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

Ecuación 2

La dispersión de la información en una población se mide por medio de la varianza σ^2, la cual es el segundo momento alrededor de la media:

$$E[(x-\mu)^2] = \sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x-\mu)^2 \; f(x)\, dx$$

Ecuación 3

El valor estimado sobre una muestra de la varianza está dado por:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2$$

Ecuación 4

en el cual el divisor es (n – 1) en lugar de n para asegurar que el parámetro estadístico obtenido de la muestra no sea sesgado, es decir, que no tenga una tendencia, en promedio, a ser mayor o menor que el valor verdadero estimado con la población. La varianza tiene dimensiones de [X]2. La desviación estándar σ es una medida de la dispersión que tienen las observaciones de X. La cantidad de σ es la raíz cuadrada de la varianza y se estima por s. A medida que la desviación estándar aumenta, aumenta la dispersión de la información. El coeficiente de variación CV = σ/μ, estimado por $s / \bar{x}$, es una medida adimensional de la variabilidad.

La simetría de una distribución alrededor de la media se mide utilizando la asimetría la cual es el tercer momento alrededor de la media:

$$E[(x-\mu)^3] = \int_{-\infty}^{\infty} (x-\mu)^3 \; f(x)\, dx$$

Ecuación 5

La asimetría normalmente se construye en forma adimensional dividiendo la Ecuación 2-16 por σ3 para dar el coeficiente de asimetríaγ:

$$\gamma = \frac{1}{\sigma^3} E[(x-\mu)^3]$$

Ecuación 6

2.2. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS BÁSICAS EN LAS SERIES HISTÓRICAS.

En esta sección se desarrollan las cuatro verificaciones que se realizan a cada una de las series de lluvias máximas diarias, para garantizar que la muestra de la que partimos es representativa, es decir, que describe las características generales de la población a la que pertenece, y que a la misma se le puede aplicar la estadística inferencial. Las verificaciones son:

- Detección de datos atípicos en la serie.
- Prueba de Independencia (Wald-Wolfowitz).
- Prueba de Estacionariedad (Kendall).
- Prueba de Homogeneidad a Escala Anual (Wilcoxon).

2.2.1. Detección de datos atípicos en la serie.

Los "datos atípicos" son definidos como registros que se alejan significativamente de la tendencia observada en la muestra (suponiendo que se encuentran normalmente distribuidos). La retención o eliminación de estos datos puede afectar significativamente la magnitud de los parámetros estadísticos, especialmente en muestras pequeñas.

La metodología para la detección de los datos atípicos consiste en el análisis de las series históricas de datos correspondientes a las lluvias máximas anuales de las distintas estaciones emplazadas en el territorio provincial. A dichas series se les aplicó el logaritmo neperiano procediendo a la determinación de la media **y** y el desvío estándar **sy**. La siguiente ecuación (aplicando la metodología propuesta por Chow -1959) de frecuencia puede utilizarse para detectar datos atípicos:

$$Y = \bar{y} \pm K_n s_y$$

Ecuación 7

Donde Y es el umbral de dato atípico alto o bajo, en unidades logarítmicas, K_n es un valor que depende del tamaño de la muestra (Tabla 1). Si los logaritmos de los valores en una muestra son mayores que Ys (límite superior) entonces se consideran como datos atípicos altos, análogamente en el caso de ser menores que Yi (límite inferior) serán tomados como datos atípicos bajos.

Tamaño de muestra	Kn	Tamaño de muestra	Kn	Tamaño de muestra	Kn	Tamaño de muestra	Kn
10	2,036	24	2,467	38	2,661	60	2,837
11	2,088	25	2,486	39	2,671	65	2,866
12	2,134	26	2,502	40	2,682	70	2,893
13	2,175	27	2,519	41	2,692	75	2,917
14	2,213	28	2,534	42	2,700	80	2,940
15	2,247	29	2,549	43	2,710	85	2,961
16	2,279	30	2,563	44	2,719	90	2,981
17	2,309	31	2,577	45	2,727	95	3,000
18	2,335	32	2,591	46	2,736	100	3,017
19	2,361	33	2,604	47	2,744	110	3,049
20	2,385	34	2,616	48	2,753	120	3,078
21	2,408	35	2,628	49	2,76	130	3,104
22	2,429	36	2,639	50	2,768	140	3,129
23	2,448	37	2,65	55	2,804		

Tabla 1: Valores Kn para la prueba de datos atípicos

2.2.2. Prueba de Independencia (Wald-Wolfowitz).

Una de las condiciones para poder analizar estadísticamente las series de datos es que los mismos sean aleatorios. Se busca que la probabilidad de ocurrencia de uno cualquiera de ellos no dependa de la ocurrencia de los datos que le preceden y que tampoco este influya a los datos que le siguen o datos futuros. Es decir que para el análisis estadístico se requiere que la muestra esté compuesta por datos independientes de los demás.

Una de estas pruebas estadísticas de independencia es la de secuencias de una muestra de Wald-Wolfowitz. En la misma, las hipótesis a contrastar son las siguientes:

H_0: El proceso que genera el conjunto de datos numéricos es aleatorio.
H_1: El proceso que genera el conjunto de datos numéricos no es aleatorio.

En esta prueba se compara cada valor observado con la media de la muestra. Se le asigna a cada dato un término E o F (éxito o fracaso) según si el valor es mayor o menor que la media de la muestra.

Para evaluar la aleatoriedad de la muestra, se considera como estadístico de prueba al número de secuencias presente en los datos. Una secuencia se define como una serie éxitos o fracasos consecutivos. Luego en la muestra completa se puede distinguir:

R : Número de secuencias;
n_1: Número de éxitos, o de valores superiores a la media;
n_2: Número de fracasos, o de valores inferiores a la media;
n : Número de datos en la muestra

En la prueba se utiliza el valor estadístico Z para una prueba de dos extremos. Si Z es mayor o igual al valor critico superior, o menor o igual al valor critico inferior, la hipótesis nula de aleatoriedad puede ser rechazada al nivel de significancia α. Sin embargo, si Z se encuentra entre estos límites, la hipótesis nula de aleatoriedad puede aceptarse. El valor estadístico Z se determina de la siguiente manera:

$$Z = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R^2}$$

Ecuación 8

Dónde:

$$\mu_R = \frac{2 \cdot n_1 \cdot n_2}{n} + 1$$

Ecuación 9

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{(\mu_R - 1)(\mu_R - 2)}{n-1}}$$

Ecuación 10

El valor del estadístico Z, se contrasta con el valor de tabla de la distribución normal para un cierto nivel de significancia establecido.

2.2.3. Prueba de Estacionariedad (Kendall).

Mediante la prueba estadística de estacionariedad de Kendall se busca que en la serie de datos no se presente una tendencia temporal. Para cada dato de la serie, la cual se encuentra ordenada cronológicamente, se calcula cuantos datos posteriores son superiores **(S).** De esta forma:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} s(i)$$

Ecuación 11

En donde **s(i)** es el número de los valores en la serie tal que Xj>Xi, siendo i<j≤ n. Por otro lado se determinan cuantos valores posteriores son menores **(T)**(T). Los mismos se determinan de la siguiente manera:

$$T = \sum_{i=1}^{n-1} t(i)$$

Ecuación 12

En donde **t(i)** es el número de valores en la serie tal que Xj< Xi, siendo i < j ≤ n. Con los valores de **S**S y **T** calculados con las Ecuaciones 2-5 y 2-6, se define el índice I = S -T T, que debe ser próximo a cero si la hipótesis nula es verdadera.

Por lo tanto se deben verificar las siguientes condiciones:

- $I < I_{cri}\ (\alpha)$, o sea que el *I* calculado sea menor que un valor de I crítico tabulado en función del tamaño de la muestra y según diferentes niveles de significación.

- Para tamaños de muestra mayores a 10, el valor del estadístico se aproxima a una distribución normal. Por lo que se debe utilizar una forma estandarizada del estadístico en donde se transforma el índice I en el índice *K*, definido como:

$$K = \frac{I - 1}{\left(\frac{N * (N-1) * (2N+5)}{18}\right)^{0.5}} \quad I > 0$$

$$K = 0 \qquad I = 0$$

$$K = \frac{I+1}{\left(\frac{N*(N-1)*(2N+5)}{18}\right)^{0.5}} \quad I < 0$$

$$K = \frac{I+1}{\left(\frac{N*(N-1)*(2N+5)}{18}\right)^{0.5}} \quad I < 0$$

Ecuación 13

Los valores de Kcri son obtenidos de una distribución Normal, los cuales son presentados en la Tabla 2.

Nivel de significancia	0,01	0,05	0,1
Kcri	2,33	1,64	1,28

Tabla 2: Valores de Kcri para el test de Kendall

2.2.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual (Wilcoxon).

La prueba de homogeneidad a escala anual de Wilcoxon permite comprobar si el promedio de un primer subconjunto de la muestra difiere significativamente del promedio de un segundo subconjunto de la muestra. Para efectuar esta prueba se debe sustituir las observaciones de las dos muestras de tamaños N_1 y N_2, por sus rangos combinados. Los rangos son asignados de tal manera que el rango 1 se asigna a la más pequeña de las $N = N_1 + N_2$ observaciones combinadas, el rango 2 se le asigna a la siguiente más, de modo que el rango N queda asignado a la observación más grande. Si varias observaciones tienen el mismo valor, se asigna a cada una de estas el promedio de los rangos que, en otra circunstancia, se les habría asignado.

La estadística de la prueba de Wilcoxon T_1, es simplemente la suma de los rangos asignados a las n 1 observaciones de la muestra más pequeña. Para cualquier valor entero n, la suma de los n primeros enteros consecutivos pueden calcularse fácilmente como N (N +1)/2. La estadística de prueba T_1, más la suma de los rangos asignados a los N 2 elementos de la segunda muestra, T_2, por consiguiente, debe ser igual a este valor, es decir:

$$T_1 + T_2 = \frac{N(N+1)}{2}$$

Ecuación 14

De modo que esta ecuación puede ser empleada como verificación del procedimiento de asignación de rangos.

La prueba de la hipótesis nula puede ser de dos extremos o de un extremo, dependiendo de si se está probando si los dos promedios de población son exclusivamente diferentes o si una es mayor que la otra.

La estadística de prueba, T_1, está distribuida de manera aproximadamente normal. Se puede emplear la siguiente formula de aproximación de muestra grande para probar la hipótesis nula:

$$|Z| = \frac{T_1 - \mu_{T_1}}{\sigma_{T_1}}$$

Ecuación 15

El valor medio de la estadística de prueba T_1, puede calcularse con:

$$\mu_{T_1} = \frac{n_1(n+1)}{2}$$

Ecuación 16

y la desviación estándar de la estadística de prueba T_1, se puede calcular con:

$$\sigma_{T_1} = \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2(n+1)}{12}}$$

Ecuación 17

Basándose en α, el nivel de significación seleccionado, la hipótesis nula puede ser rechazada si el valor Z calculado cae en la región de rechazo apropiada.

2.3. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL.

La estadística inferencial estudia la población a partir del estudio de una muestra, y el grado de fiabilidad o significación de los resultados obtenidos. En esta sección del informe se desarrolla:

- Función de distribución de probabilidad empírica.
- Ajuste de función de distribución de probabilidad.
  - Ajuste por el Método de Momentos.
  - Ajuste por el Método de Máxima Verosimilitud.
- Estimación de los valores máximos para distintos periodos de retorno.

2.3.1. Función de distribución de probabilidad empírica.

En la naturaleza, la mayoría de los fenómenos hidrológicos constituyen procesos aleatorios y dado que la planificación y el diseño están basados en eventos futuros, cuya magnitud y tiempo de ocurrencia no pueden predecirse, se debe recurrir al estudio de las probabilidades o frecuencias con que un determinado evento puede ser igualado o excedido.

Weibull estableció que la probabilidad de excedencia (porcentaje de veces durante el cual un determinado evento es igual o mayor a la cantidad indicada) de un evento dado se corresponde con la siguiente expresión:

$$p = \frac{m}{(N+1)}$$

Ecuación 18

Donde **N** corresponde al número total de datos de una serie (años de registro) y **m** representa el número de orden de la serie arreglada en forma creciente.

2.3.2. Ajuste de la función de distribución de probabilidad.

Una distribución de probabilidad es una función que representa la probabilidad de ocurrencia de una variable aleatoria. Mediante un ajuste de una distribución de un conjunto de datos hidrológicos, una gran cantidad de información estadística de la muestra puede resumirse en forma compacta en la función y en sus parámetros asociados.

2.3.2.1. Ajuste por el Método de Momentos.

Fue desarrollado por Karl Pearson, (1902). Él consideró que unos buenos estimadores de los parámetros de una función de probabilidad son aquellos para los cuales los momentos

de la función de densidad de probabilidad alrededor del origen son iguales a los momentos correspondientes de la información de la muestra.

Si a cada uno de los valores de la información se le asigna una masa hipotética igual a su frecuencia relativa de ocurrencia (1/**n**) y si se imagina que este sistema de masas rota alrededor del origen **x**x = 0, entonces el primer momento de cada observación **xi**x_i alrededor del origen es el producto de su brazo de momento **xi**x_i y de su masa 1/**n** n, y la suma de estos momentos para toda la información es la media de la muestra.

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{x_i}{n} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i = \bar{x}$$

Ecuación 19

Esto es equivalente al centroide de un cuerpo. El centroide correspondiente de la función de probabilidad es:

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx$$

Ecuación 20

El segundo y el tercer momento en la distribución de probabilidad pueden igualarse a los valores de la muestra para determinar los valores de los parámetros de la distribución de probabilidad. Originalmente Pearson consideró solamente momentos alrededor del origen, pero posteriormente se volvió común el uso de la varianza como el segundo momento central, $\sigma 2 = E[(x-\mu)2]$, y el coeficiente de asimetría como el tercer momento central estandarizado, $\gamma = E[(x-\mu)3] / \sigma 3$, para determinar el segundo y el tercer parámetro de la distribución si se requería.

2.3.2.2. Ajuste por el Método de Máxima Verosimilitud.

Fue desarrollado por Fisher, (1922). Él razonó que el mejor valor de un parámetro de una distribución de probabilidad debería ser el valor que maximizara la verosimilitud o probabilidad conjunta de ocurrencia de la muestra observada. Si se supone que el espacio muestral se divide en intervalos de longitud **dx**dx y se toma una muestra de observaciones independientes e idénticamente distribuidas **x1, x2,…, xn**$x_1, x_2, \ldots, x_n$. El valor de la densidad de probabilidad para **X** = **xi** X = $x_i$es **f (xi)**, y la probabilidad de que la variable aleatoria ocurra en el intervalo que incluye **xi** es **f(xi)dx**. Debido a que las observaciones son independientes (verifican de acuerdo a hipótesis de sección 2.1.2), su probabilidad de ocurrencia conjunta está dada por la Ecuación 2-19. Como el producto:

$$f(x_1)dx\, f(x_2)dx \ldots f(x_n)dx = \left[\prod_{i=1}^{n} f(x_i)\right] dx^n$$

Ecuación 21

Y puesto que el tamaño del intervalo **dx**dx es fijo, el maximizar la probabilidad conjunta de la muestra observada es equivalente a maximizar la función de verosimilitud:

$$L = \prod_{i=1}^{n} f(x_i)$$

Ecuación 22

Debido a que muchas funciones de densidad de probabilidad son exponenciales, algunas veces es conveniente trabajar con la función logaritmo de la verosimilitud:

$$\ln L = \sum_{i=1}^{n} \ln\left[f(x_i)\right]$$

Ecuación 23

El método de la máxima verosimilitud teóricamente es el más correcto para ajustar distribuciones de probabilidad a información en el sentido de que produce los estimativos de parámetros más eficientes, ya que estiman los parámetros de la población con los menores errores promedio. Pero, para algunas distribuciones de probabilidad, no existe solución analítica para todos los parámetros en términos de las estadísticas de la muestra y la función logaritmo de verosimilitud debe maximizarse numéricamente, lo cual puede ser bastante difícil.

2.3.3. Estimación de los valores máximos para distintos periodos de retorno.

El periodo de retorno **T** de un evento puede definirse como el intervalo promedio entre eventos que igualan o exceden una magnitud especificada. El mismo, puede considerarse como la inversa de la probabilidad de ocurrencia de un evento de igual o mayor magnitud de un evento crítico.

$$\mathrm{P}(X \geq x_t) = \frac{1}{T}$$

Ecuación 24

Este concepto es muy utilizado en el diseño hidrológico. En el diseño hidrológico existen tres enfoques para decidir el periodo de retorno óptimo: una aproximación empírica, un análisis del riesgo asumido o un análisis hidroeconómico. Los dos primeros evalúan la amenaza en si

mientras que el último tiene en cuenta también la vulnerabilidad del sistema y considera el riesgo en su conjunto.

En cuanto al método empírico tiene en cuenta la probabilidad de ocurrencia **P (np, nd, no)** de que en np años de predicción futuros se alcance o se supere la magnitud del evento crítico, de duración nd años, medido en no años de observación precedentes.

$$P(n_p, n_d, n_o) = \frac{n_p - n_d + 1}{(n_o - n_d + 1) + (n_p - n_d + 1)}$$

$$P(n_p, n_d, n_o) = \frac{n_p - n_d + 1}{n_o + n_p - 2 * n_d + 2}$$

Ecuación 25

Cuando el evento critico persiste menos de un año puede considerarse **nd**=1. Luego la Ecuación 2-23 queda:

$$P(n_p, n_o) = \frac{n_p}{n_o + n_p}$$

Ecuación 26

En el análisis hidroeconómico se determina el tiempo de retorno de manera tal que los costos totales sean mínimos. Para la determinación de los costos totales se debe tener en cuenta que si bien al aumentar el periodo de retorno se reducen los costos o riesgos ante una falla, la magnitud y costo de una obra se ven incrementadas; para este método la cantidad de información necesaria es mucho mayor que para los demás. En la Tabla 3 se presentan rangos de valores usualmente seleccionados de periodos de retorno para el diseño de estructuras de control en las que se ven implicados fenómenos hidrológicos.

Tipo de Estructuras	Periodo de Retorno (años)
Alcantarillas	
Volúmenes de tráfico bajos	05-Oct
Volúmenes de tráfico medios	10 – 25
Volúmenes de tráfico altos	50 – 100
Puentes	
Sistema secundario	5 – 50
Sistema primario	50 – 100
Drenaje urbano	
Alcantarillas pequeñas	2 – 25
Alcantarillas grandes	25 – 50

Tabla 3: Periodos de retorno en años utilizados para el diseño de estructuras de control de agua (Chow, 1994)

3. INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA ANALIZADA.

3.1. RECOPILACIÓN DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICA HISTÓRICA.

Se recopiló información de lámina de lluvia diaria de las estaciones pluviométricas instaladas en las provincias de Neuquén y Rio Negro.

Son 59 las estaciones pluviométricas que se obtuvieron de la recopilación de datos históricos de diferentes fuentes pertenecientes a entidades gubernamentales, tales como:

http://bdhi.hidricosargentina.gov.ar/sitioweb/frmFiltro.aspx

http://www.tutiempo.net/clima/Argentina/AR.html

http://www.aic.gob.ar

3.2. LOCALIZACIÓN ESPACIAL DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS SELECCIONADAS.

En la Tabla 4 se muestran las estaciones recopiladas en primera instancia para la provincia de Neuquén y Rio Negro, y en la Figura 8 la localización de las estaciones.

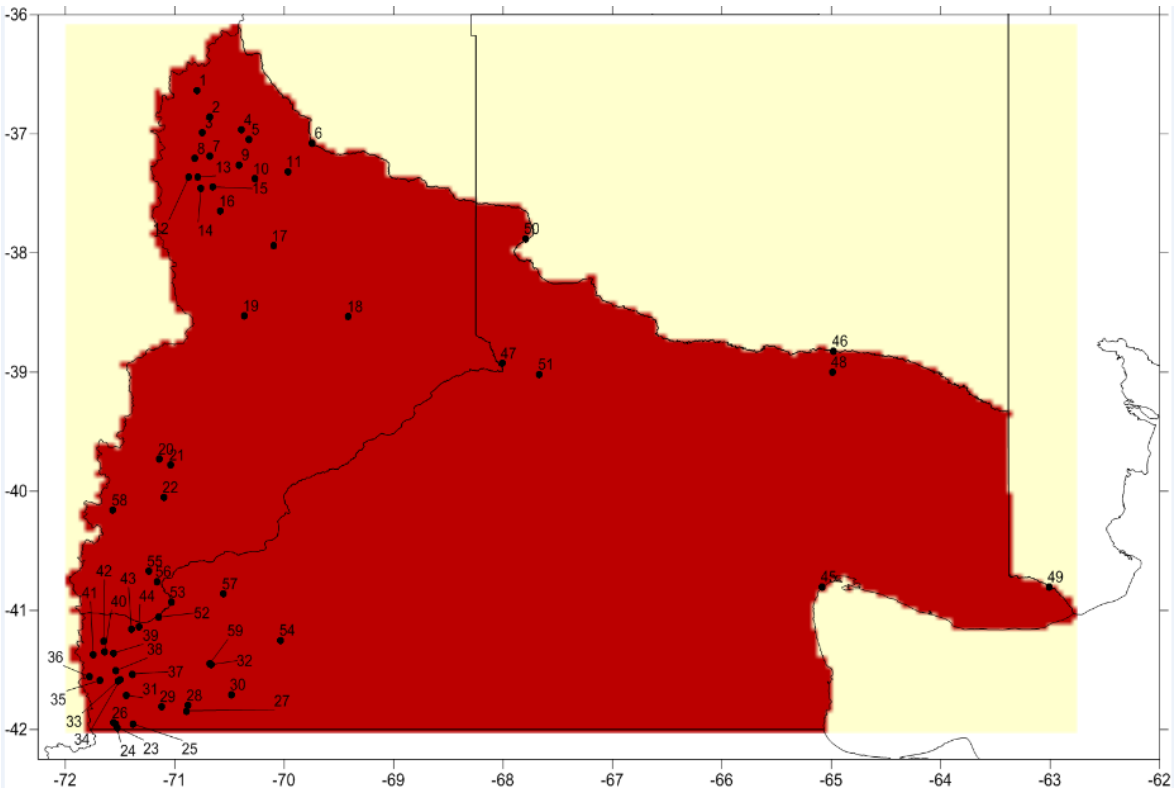


Figura 8: Disposición espacial de las estaciones pluviométricas encontradas en la provincia de Neuquén y Rio Negro

Codigo	Estacion	Provincia	Serie	Latitud	Longitud
1	Pichi Neuquen	Neuquen	36	-36.631	-70.801
2	Neuquen-Varvarco	Neuquen	42	-36.858	-70.683
3	Nahueve-Las Ovejas	Neuquen	42	-36.988	-70.749
4	Carileuvu-Cajon Carileuvu	Neuquen	41	-36.965	-70.391
5	Curileuvu-Tricao Malal	Neuquen	41	-37.044	-70.322
6	Colorado-Buta Ranquil	Neuquen	45	-37.076	-69.747
7	Neuquen-Andacollo	Neuquen	40	-37.186	-70.68
8	Lileo-Los Miches	Neuquen	41	-37.206	-70.819
9	Curileuvu-El Alamito	Neuquen	41	-37.258	-70.415
10	Neuquen-Chos Malal	Neuquen	36	-37.375	-70.27
11	Auquinco-Auquinco	Neuquen	36	-37.316	-69.969
12	Reñileuvu-Estancia Chacayco	Neuquen	33	-37.359	-70.871
13	Reñileuvu-Chochoy Mallin	Neuquen	41	-37.362	-70.794
14	Trocoman-Vilu Mallin	Neuquen	29	-37.455	-70.761
15	Trocoman-El Cholar	Neuquen	35	-37.444	-70.653
16	Agrio-El Huecu	Neuquen	39	-37.648	-70.583
17	Chorriaca-Chorriaca	Neuquen	24	-37.938	-70.099
18	Neuquen-Paso de Indios	Neuquen	68	-38.532	-69.414
19	Agrio-Las Lajas	Neuquen	32	-38.526	-70.366
20	Malleo-Estancia Tres Picos	Neuquen	28	-39.729	-71.141
21	Malleo-Malleo	Neuquen	22	-39.778	-71.039
22	Quilquihue-Junin de los Andes	Neuquen	43	-40.050	-71.1
23	Lago Puelo-Oficina Tecnica	Rio Negro	41	-41.984	-71.523
24	Quemquentreu-El Bolson	Rio Negro	13	-41.953	-71.539
25	El Ternero-Cuesta del Ternero	Rio Negro	6	-41.953	-71.382
26	Azul-El Azul	Rio Negro	44	-41.942	-71.56
27	Ñorquinco-Ñorquinco	Rio Negro	34	-41.843	-70.892
28	Ñorquinco-Fita Timen	Rio Negro	11	-41.797	-70.88
29	Alto Chubut-Nacimiento	Rio Negro	45	-41.806	-71.124
30	Chico-Cerro Mesa	Rio Negro	44	-41.705	-70.483
31	Foyel-Ruta Nacional N°258	Rio Negro	2	-41.711	-71.442
32	Las Bayas-Las Bayas	Rio Negro	26	-41.456	-70.669
33	Manso-Poblador Turra	Rio Negro	25	-41.594	-71.521
34	Villegas-Ruta Nacional N°258	Rio Negro	31	-41.580	-71.5
35	Manso-Confluencia	Rio Negro	40	-41.587	-71.684
36	Manso-Manso Inferior	Rio Negro	40	-41.556	-71.78
37	Manso-Lago Steffen	Rio Negro	9	-41.533	-71.386
38	Lago Steffen-Muelle	Rio Negro	23	-41.506	-71.542
39	Lago Mascardi-Central Frey	Rio Negro	24	-41.358	-71.563
40	Manso-Los Moscos	Rio Negro	15	-41.348	-71.641
41	Manso-Los Alerces	Rio Negro	49	-41.374	-71.746
42	Manso-Pampa Linda	Rio Negro	9	-41.255	-71.652
43	Gutierres-Los Cohihues	Rio Negro	43	-41.157	-71.397
44	Limay-San Carlos de Bariloche. Km 1	Rio Negro	14	-41.139	-71.327
45	SN-Las Grutas	Rio Negro	9	-40.800	-65.084
46	Colorado-Pichi Mahuida	Rio Negro	37	-38.822	-64.981
47	Negro-Cipolletti	Rio Negro	7	-38.925	-68.008
48	Colorado-Rio Colorado	Rio Negro	4	-38.998	-64.99
49	Negro-Viedma DPA	Rio Negro	11	-40.801	-63.012
50	Colorado-Catriel	Rio Negro	15	-37.877	-67.797
51	Guerrico-Allen	Rio Negro	46	-39.017	-67.667
52	Nahuel Huapi	Neuquen	38	-41.056	-71.147
53	Estancia La Lonja	Neuquen	35	-40.929	-71.033
54	Clemente Onelli	Rio Negro	34	-41.248	-70.032
55	Salmonicultura	Neuquen	31	-40.671	-71.241
56	Cuyin Manzano	Neuquen	38	-40.756	-71.165
57	Estancia San Pedro	Rio Negro	35	-40.861	-70.556
58	Estancia Quechuquina	Neuquen	64	-40.158	-71.564
59	Estancia Las Bayas	Rio Negro	74	-41.449	-70.683

Tabla 4: Estaciones pluviométricas seleccionadas de Neuquén y Rio Negro

3.3. SELECCIÓN DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS.

En el presente trabajo se determinaron las láminas de lluvia máximas para distintos períodos de retorno, T= 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años. No se realiza el análisis para un período de retorno mayor ya que la bibliografía aconseja que la cantidad de años en los cuales se puede realizar una extrapolación confiable es igual a cinco veces la longitud de la serie de la muestra; es decir, para un registro de 20 años por ejemplo, puede realizarse una extrapolación confiable de hasta 100 años.

El criterio de Longitud de Serie consistió, en un principio, en fijar veinte años como longitud mínima de las series anuales de lluvias máximas diarias a analizar.

Teniendo en cuenta estudios similares realizados en provincias vecinas, para homogeneizar el análisis realizado en nuestra región de estudio, se adoptó un criterio menos restrictivo. Se decidió la aceptación de todas las estaciones con una longitud de serie mayor o igual a catorce años, utilizándose de esta manera el total de las estaciones de las cuales tenemos datos.

En la Tabla 5 y en la Figura 9 se puede observar la cantidad de estaciones que pertenecen a cada intervalo de longitud de serie, es decir, entre uno y catorce años, entre catorce y veinte y mayor o igual de veinte. Aquellas estaciones con más de catorce años de registro son las que continuaron las verificaciones subsiguientes.

Longitud de serie – Neuquen y Rio Negro		
Estaciones con datos	59	Porcentaje
1 < Longitud de serie < 14	10	16,9%
Longitud de serie >= 14	49	83,05%
Longitud de serie >= 20	46	77,97%

Tabla 5: Porcentajes de las estaciones pluviométricas de Neuquén y Rio Negro en función de su longitud de serie

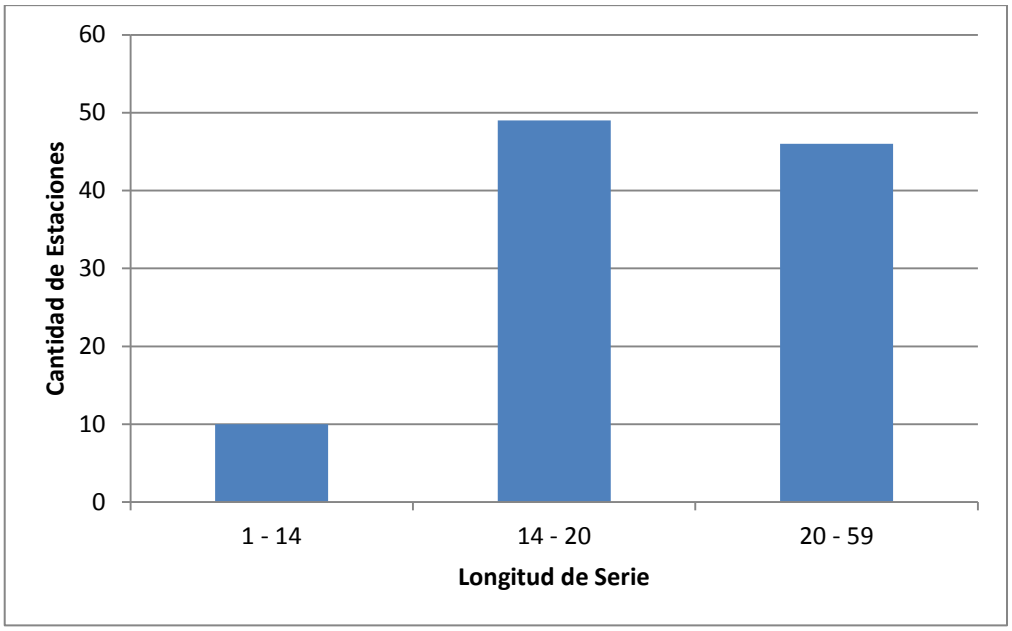


Figura 9: Longitud de registro de las estaciones pluviométricas de Neuquén y Rio Negro

4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO COMPLETO DE LOS REGISTROS DE UNA SERIE SELECCIONADA.

En el presente capítulo, en base a los registros pluviométricos de una estación ejemplo elegida, se realiza el análisis estadístico completo descripto en el capítulo II.

4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS REGISTROS A ANALIZAR.

A modo de ejemplo, se presenta el análisis estadístico completo de los registros de lluvia diaria de la estación Paso de los Indios (código interno 18) localizada en la provincia de Neuquén. Se elige esta serie por tener una longitud de registro de datos de 68 años. En forma similar se analizaron las otras 48 estaciones de las provincias de Neuquén y Rio Negro.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede apreciar la forma en que se proporcionaron los datos de la estación Paso de los Indios; y se observa que se partió en este caso de las láminas de lluvia máximas diarias de cada año hidrológico.

Para el análisis de los datos se creó, en Excel, una "Planilla Modelo" (que a su vez fue utilizada para el resto de las estaciones) que contiene 3 pestañas específicas. Al inicio de la primera de ellas (llamada "Datos Básicos") se debe dejar asentados los datos de la estación, como son:

- El año de inicio de la recolección de dichos datos.
- Nombre de la estación.
- Coordenadas y ubicación.
- Provincia.
- Código interno asignado a la estación.

Siguiendo con el análisis de la estación Paso de los Indios (que será analizada a modo de ejemplo en forma completa en este capítulo), en la Figura 10, se presenta la evolución temporal de los máximos valores anuales de lluvia diaria en función del año en que se registró el evento para la estación Paso de los Indios. Los registros cuentan con 68 años de longitud, siendo el segundo más extenso de todas las series registradas.

Estacion: Paso de los Indios				
Maximos Anuales				
Fecha	Precipitacion max. 1 dia (mm)		Fecha	Precipitacion max. 1 dia (mm)
1943	12.3		1985	11.6
1944	24		1986	15.5
1945	36.8		1987	26.6
1946	22.8		1988	45.6
1947	17		1989	25.8
1948	22		1990	15.7
1949	25		1991	21.2
1950	14.5		1992	22.4
1952	30		1993	27.4
1953	14		1994	32.3
1954	16		1995	26.9
1955	26		1996	18
1956	29.5		1997	23.5
1957	42		1998	35
1958	29.5		1999	25.2
1959	54		2000	21.5
1960	26.6		2001	81.8
1961	25.8		2002	42
1963	57		2003	13.8
1964	20.5		2004	53.6
1965	16.9		2005	35.5
1966	53.4		2006	23
1967	9.6		2007	13.6
1969	44.3		2008	28
1970	42.2		2009	56
1971	32.6		2010	15.2
1972	24		2011	20
1973	47.3		2012	20
1975	36.9		2013	33.4
1976	26.6		2014	26.5
1977	20.1			
1978	17.3			
1979	40			
1980	27.8			
1981	18.2			
1982	16.2			
1983	20.1			
1984	33.5			

Tabla 6: Planilla de lluvias diarias máximas anuales de la estación Paso de los Indios en la Provincia de Neuquén

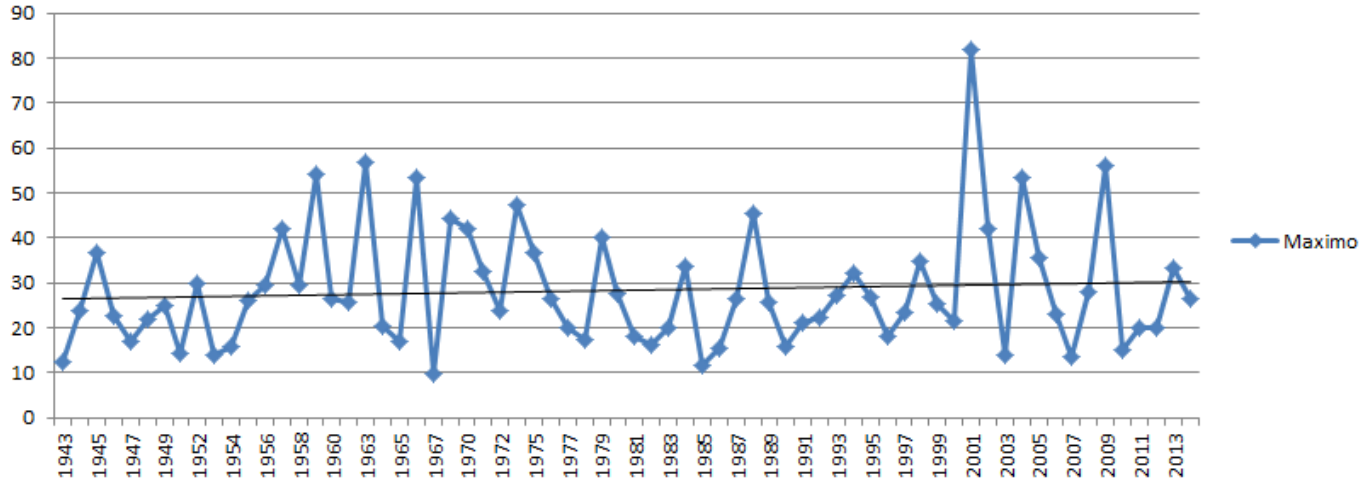


Figura 10: Evolución temporal de los valores máximos anuales de lluvia diaria para la estación de Paso de los Indios en la Provincia de Neuquén.

4.2. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.

El procedimiento del análisis descriptivo de datos con Hyfran puede resumirse en:

a) La pestaña "Descripción" (Figura 11) se coloca el número y nombre de la estación como "Titulo del Proyecto"; se borran los comentarios, se coloca "PMDA" en el nombre de la variable, "mm" en unidad y "3" en números significativos. En formula de probabilidad empírica se selecciona 0.00, correspondiente a la Formula de Weibull.

b) En la pestaña "Datos" se copian los años con datos de lluvia máxima anual (eliminando datos atípicos), teniendo en cuenta de cambiar las "," por "." ya que es el formato a introducir en el programa Hyfran y se borran los datos excedentes. Los datos obtenidos (Observaciones, Identificador y Probabilidad empírica) se copian y se pegan en la segunda pestaña de la Planilla Modelo construida en Excel, siendo ésta, "Hyfran Muestra" (Figura 12 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se pueden observar de manera completa los datos con las probabilidades empíricas de no excedencia, no así en la Figura 12 que esta recortada.

c) Se selecciona la pestaña "Estadística de Base", la cual nos proporciona los datos estadísticos correspondientes a los valores mínimos, máximos, mediana, desvío estándar y coeficientes de asimetría, variación y curtosis (Figura 13).

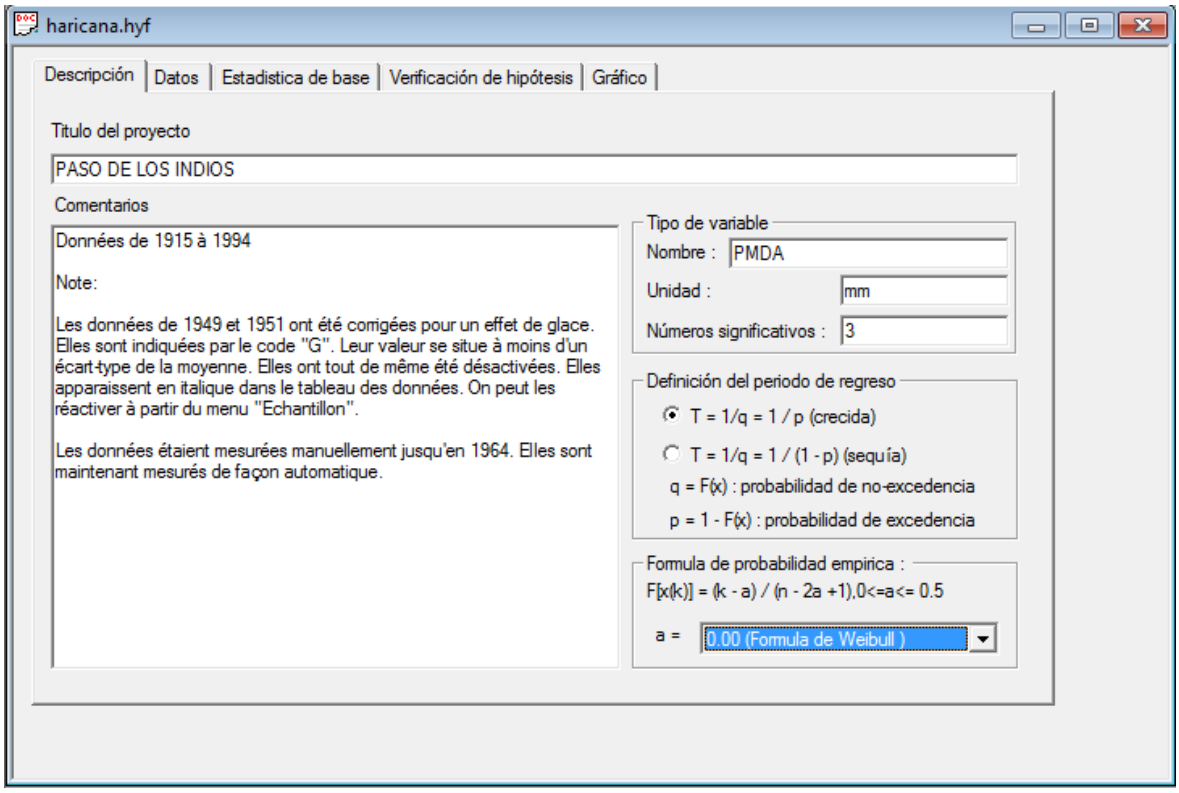
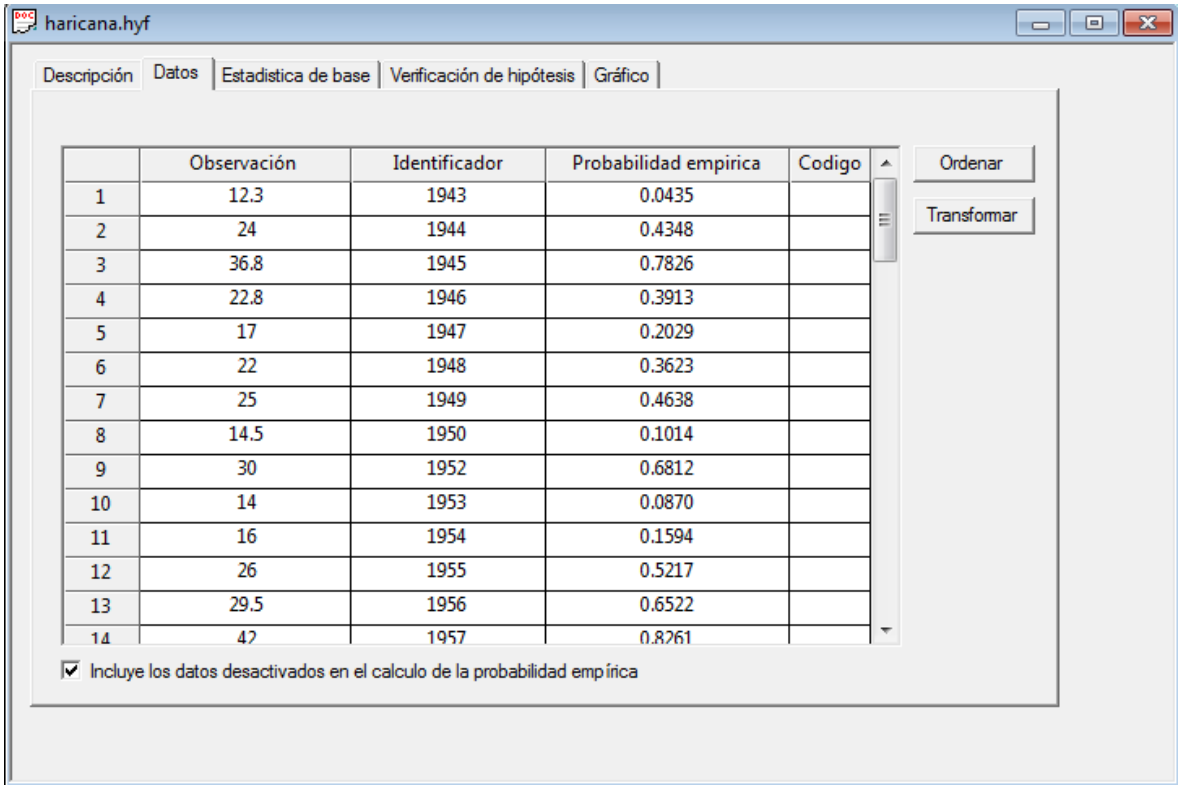


Figura 11: Salida del programa Hyfran para descripción de la estación



	Observación	Identificador	Probabilidad empirica	Codigo
1	12.3	1943	0.0435	
2	24	1944	0.4348	
3	36.8	1945	0.7826	
4	22.8	1946	0.3913	
5	17	1947	0.2029	
6	22	1948	0.3623	
7	25	1949	0.4638	
8	14.5	1950	0.1014	
9	30	1952	0.6812	
10	14	1953	0.0870	
11	16	1954	0.1594	
12	26	1955	0.5217	
13	29.5	1956	0.6522	
14	42	1957	0.8261	

Figura 12: Determinación, utilizando el programa Hyfran, de probabilidades empíricas de cada dato de lluvia diaria máxima anual utilizando la Ecuación de Weibull para la estación Paso de los Indios en la Provincia de Nenquen (código 18)

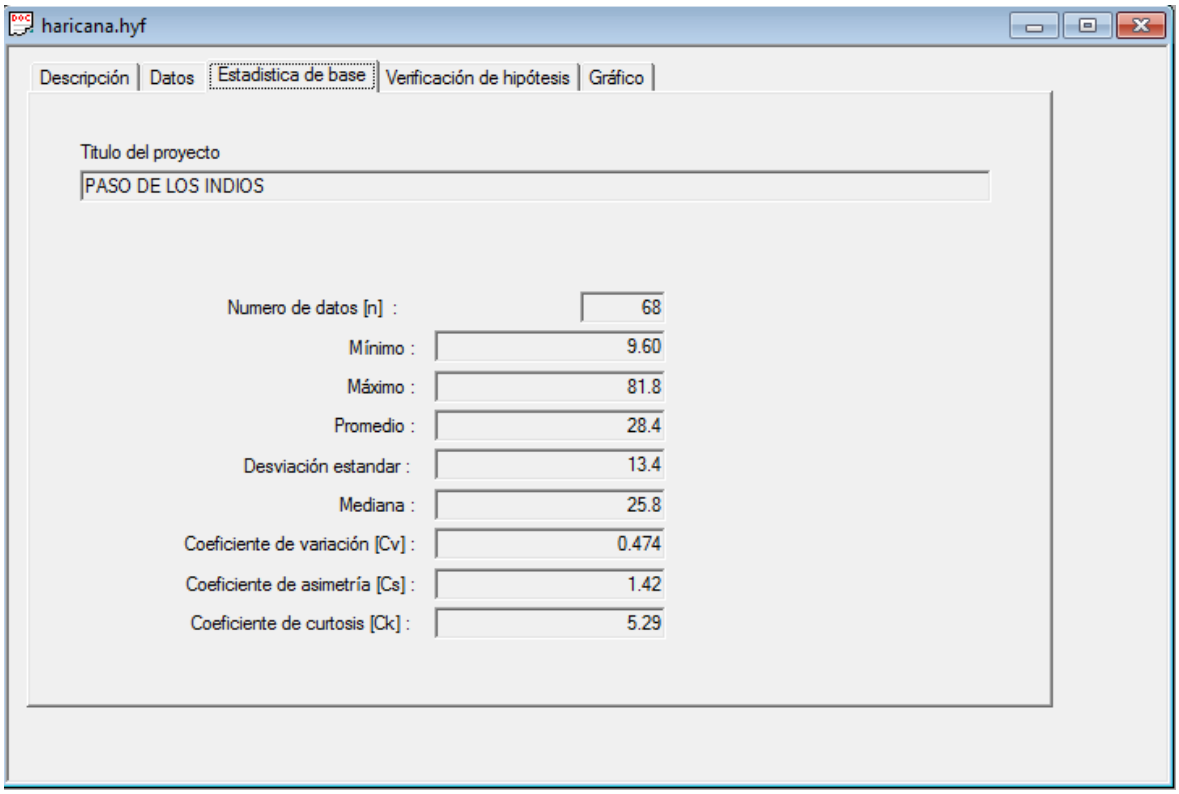


Figura 13: Salida de Estadística Base de la estación Paso de los Indios en la Provincia de Neuquén (código 18)

Observación	Identificador	Probabilidad Empirica	Observación	Identificador	Probabilidad Empirica
12.3	1943	0.0435	45.6	1988	0.8841
24	1944	0.4348	25.8	1989	0.5072
36.8	1945	0.7826	15.7	1990	0.1449
22.8	1946	0.3913	21.2	1991	0.3333
17	1947	0.2029	22.4	1992	0.3768
22	1948	0.3623	27.4	1993	0.6087
25	1949	0.4638	32.3	1994	0.6957
14.5	1950	0.1014	26.9	1995	0.5942
30	1952	0.6812	18	1996	0.2319
14	1953	0.087	23.5	1997	0.4203
16	1954	0.1594	35	1998	0.7536
26	1955	0.5217	25.2	1999	0.4783
29.5	1956	0.6522	21.5	2000	0.3478
42	1957	0.8261	81.8	2001	0.9855
29.5	1958	0.6667	42	2002	0.8406
54	1959	0.942	13.8	2003	0.0725
26.6	1960	0.5507	53.6	2004	0.9275
25.8	1961	0.4928	35.5	2005	0.7681
57	1963	0.971	23	2006	0.4058
20.5	1964	0.3188	13.6	2007	0.058
16.9	1965	0.1884	28	2008	0.6377
53.4	1966	0.913	56	2009	0.9565
9.6	1967	0.0145	15.2	2010	0.1159
44.3	1969	0.8696	20	2011	0.2609
42.2	1970	0.8551	20	2012	0.2754
32.6	1971	0.7101	33.4	2013	0.7246
24	1972	0.4493	26.5	2014	0.5362
47.3	1973	0.8986			
36.9	1975	0.7971			
26.6	1976	0.5652			
20.1	1977	0.2899			
17.3	1978	0.2174			
40	1979	0.8116			
27.8	1980	0.6232			
18.2	1981	0.2464			
16.2	1982	0.1739			
20.1	1983	0.3043			
33.5	1984	0.7391			
11.6	1985	0.029			
15.5	1986	0.1304			
26.6	1987	0.5797			

Tabla 7: Probabilidad empírica de la no excedencia de cada dato de lluvia diaria máxima anual para la estación Paso de los Indios en la Provincia de Neuquén (código 18)

4.3. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS EN LAS SERIES DE MÁXIMOS HIDROLÓGICOS.

4.3.1. Detección de datos atípicos.

Los datos atípicos en la serie se detectan utilizando la metodología presentada en la sección 2.2.1. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observa el test realizado implementando el uso de las herramientas de Excel en la serie de la estación pluviométrica Paso de los Indios. En este caso no se detectó ningún dato atípico. En caso de detectarse uno, él mismo se elimina y luego se vuelve a realizar el análisis, si en este último caso la prueba verifica entonces se continúa con el procedimiento.

n	Prec. Max diaria anual	Año	LnMax	Datos Atipicos	Completa (x-media)^2	Trunca (x-media)^2
1	12.3	1943	2.510	VERIFICA	258.12	233.13
2	24	1944	3.178	VERIFICA	19.06	12.74
3	36.8	1945	3.605	VERIFICA	71.13	85.22
4	22.8	1946	3.127	VERIFICA	30.98	22.74
5	17	1947	2.833	VERIFICA	129.19	111.70
6	22	1948	3.091	VERIFICA	40.53	31.01
7	25	1949	3.219	VERIFICA	11.33	6.60
8	14.5	1950	2.674	VERIFICA	192.27	170.79
9	30	1952	3.401	VERIFICA	2.67	5.91
10	14	1953	2.639	VERIFICA	206.39	184.11
11	16	1954	2.773	VERIFICA	152.92	133.83
12	26	1955	3.258	VERIFICA	5.60	2.46
13	29.5	1956	3.384	VERIFICA	1.29	3.73
14	42	1957	3.738	VERIFICA	185.88	208.26
15	29.5	1958	3.384	VERIFICA	1.29	3.73
16	54	1959	3.989	VERIFICA	657.09	698.62
17	26.6	1960	3.281	VERIFICA	3.12	0.94
18	25.8	1961	3.250	VERIFICA	6.59	3.13
19	57	1963	4.043	VERIFICA	819.90	866.20
20	20.5	1964	3.020	VERIFICA	61.88	49.97
21	16.9	1965	2.827	VERIFICA	131.47	113.82
22	53.4	1966	3.978	VERIFICA	626.69	667.26
23	9.6	1967	2.262	VERIFICA	352.17	322.87
24	44.3	1969	3.791	VERIFICA	253.89	279.94
25	42.2	1970	3.742	VERIFICA	191.37	214.08
26	32.6	1971	3.484	VERIFICA	17.93	25.31
27	24	1972	3.178	VERIFICA	19.06	12.74
28	47.3	1973	3.857	VERIFICA	358.49	389.33
29	36.9	1975	3.608	VERIFICA	72.83	87.07
30	26.6	1976	3.281	VERIFICA	3.12	0.94
31	20.1	1977	3.001	VERIFICA	68.33	55.78
32	17.3	1978	2.851	VERIFICA	122.46	105.45
33	40	1979	3.689	VERIFICA	135.35	154.54
34	27.8	1980	3.325	VERIFICA	0.32	0.05
35	18.2	1981	2.901	VERIFICA	103.35	87.77
36	16.2	1982	2.785	VERIFICA	148.02	129.25
37	20.1	1983	3.001	VERIFICA	68.33	55.78
38	33.5	1984	3.512	VERIFICA	26.36	35.18
39	11.6	1985	2.451	VERIFICA	281.10	255.00
40	15.5	1986	2.741	VERIFICA	165.54	145.65
41	26.6	1987	3.281	VERIFICA	3.12	0.94
42	45.6	1988	3.820	VERIFICA	297.00	325.13
43	25.8	1989	3.250	VERIFICA	6.59	3.13
44	15.7	1990	2.754	VERIFICA	160.43	140.87
45	21.2	1991	3.054	VERIFICA	51.35	40.56
46	22.4	1992	3.109	VERIFICA	35.60	26.72
47	27.4	1993	3.311	VERIFICA	0.93	0.03
48	32.3	1994	3.475	VERIFICA	15.47	22.39
49	26.9	1995	3.292	VERIFICA	2.15	0.45
50	18	1996	2.890	VERIFICA	107.46	91.56
51	23.5	1997	3.157	VERIFICA	23.68	16.55
52	35	1998	3.555	VERIFICA	44.01	55.22
53	25.2	1999	3.227	VERIFICA	10.02	5.61
54	21.5	2000	3.068	VERIFICA	47.14	36.83
55	81.8	2001	4.404	VERIFICA	2855.17	2941.04
56	42	2002	3.738	VERIFICA	185.88	208.26
57	13.8	2003	2.625	VERIFICA	212.17	189.58
58	53.6	2004	3.982	VERIFICA	636.75	677.63
59	35.5	2005	3.570	VERIFICA	50.89	62.91
60	23	2006	3.135	VERIFICA	28.80	20.87
61	13.6	2007	2.610	VERIFICA	218.04	195.12
62	28	2008	3.332	VERIFICA	0.13	0.19
63	56	2009	4.025	VERIFICA	763.63	808.34
64	15.2	2010	2.721	VERIFICA	173.35	152.98
65	20	2011	2.996	VERIFICA	69.99	57.28
66	20	2012	2.996	VERIFICA	69.99	57.28
67	33.4	2013	3.509	VERIFICA	25.34	34.00
68	26.5	2014	3.277	VERIFICA	3.48	1.14
Promedio	28.37	Media Ln	3.2474		12101.97	12145.22
Desvío est.	13.44	Desvió Ln	0.4400		13.44	13.46
Máximo	81.8	K	**2.88**			
		Yh	4.5147	Promedio n-1 =		27.57
		Yl	1.9802	Desvío est. n-1 =		11.81

Tabla 8: Planilla resumen de datos pluviométricos

4.3.2. Prueba de Independencia.

Luego de realizada la prueba de datos atípicos, se procede a realizar la verificación de las otras hipótesis estadísticas detalladas en la sección 2.1 a través del programa Hyfran; el mismo puede describirse como un software que permite ajustar datos a leyes estadísticas. Incluye un conjunto de instrumentos matemáticos, accesibles y flexibles que permiten en particular el análisis estadístico de eventos extremos (máximos o mínimos).

La prueba de independencia de Wald-Wolfowitz, detallada en la sección 2.2.2, permite verificar la existencia de una auto-correlación significativa de primer orden entre las observaciones. En la Figura 14 se muestra el análisis realizado para la estación en cuestión.

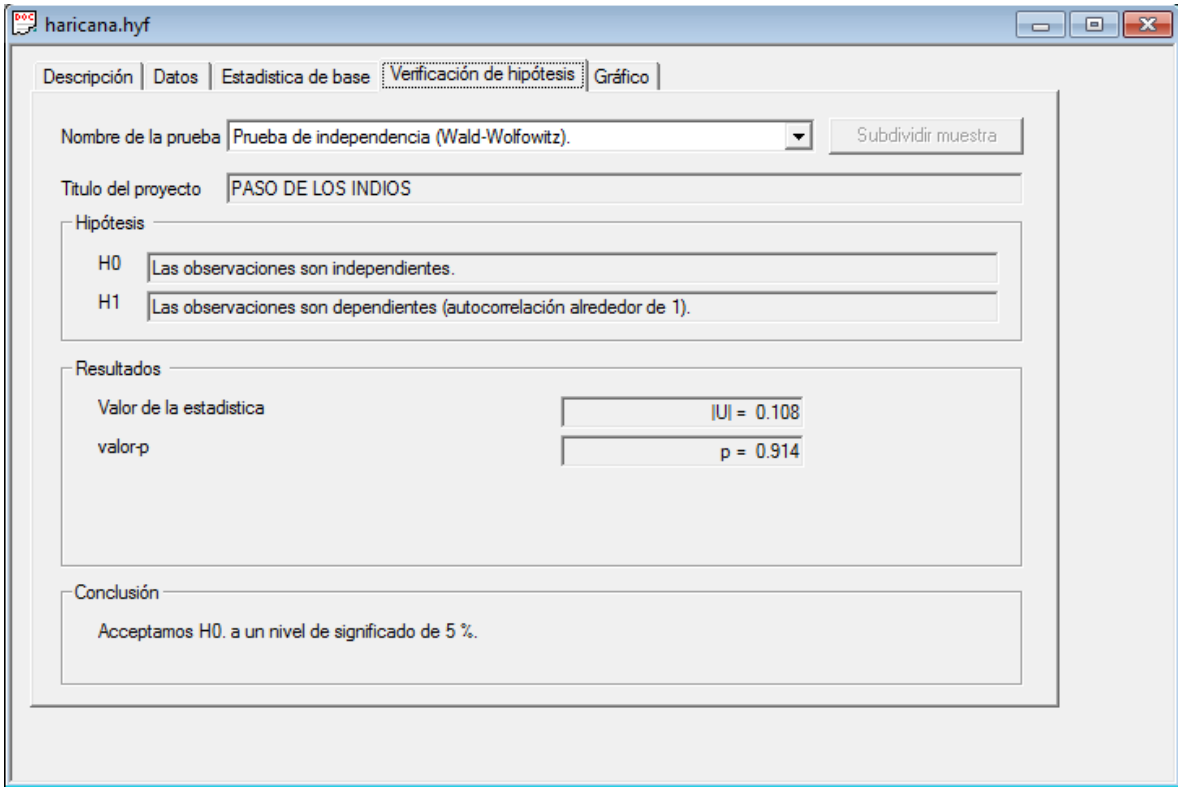


Figura 14: Salida del programa Hyfran para la prueba de independencia de la serie de máximos anuales de lluvia diaria de la estación Paso de los Indios en la Provincia de Neuquén (código 18).

Se puede observar que verifica la prueba de Independencia con un nivel de significancia del 91 %. El nivel de significación de un test es un concepto estadístico asociado a la verificación de una hipótesis. En pocas palabras, se define como la probabilidad de tomar la decisión de rechazar la hipótesis nula cuando ésta es verdadera (decisión conocida como error de tipo I, o "falso positivo"). La decisión se toma a menudo utilizando el valor P (o p-valor): si el valor P es inferior al nivel de significación, entonces la hipótesis nula es rechazada. Cuanto menor sea el valor P, más significativo será el resultado.

4.3.3. Prueba de Estacionariedad.

La prueba de estacionariedad de Kendall (detallada en la sección 2.2.3) permite verificar si existe una tendencia importante en la serie. En la Figura 15 se muestra el análisis realizado para la estación en cuestión. Se puede observar que verifica la prueba de Estacionariedad con un nivel de significancia del 74%.

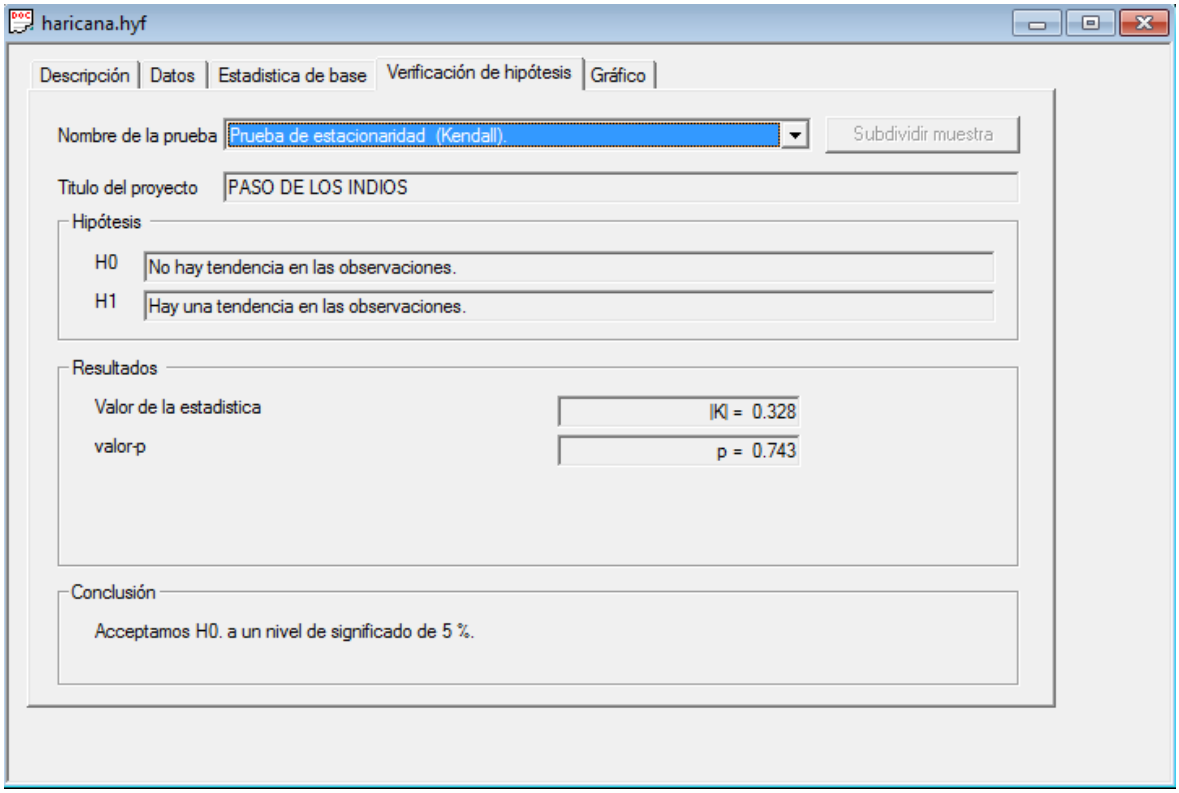


Figura 15: Salida del programa Hyfran para la prueba de estacionariedad de la serie de máximos anuales de lluvia diaria de la estación Paso de los Indios en la Provincia de Neuquén (código 18)

4.3.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual.

La prueba de homogeneidad del promedio a escala anual de Wilcoxon (detallada en la sección 2.2.4) permite comprobar si el promedio de un primer subconjunto de la muestra difiere significativamente del promedio de un segundo subconjunto de la muestra. Para esta estación se definió la fecha final del primer grupo al año 1977 a partir del análisis de la Figura 10.

El primer subgrupo se compone de las observaciones que comienzan con el primer año y terminan con un año de corte (1977), el segundo subgrupo está integrado a partir del año siguiente al año de corte hasta las observaciones finales. En la Figura 16 se muestra el

análisis realizado para la estación en cuestión, se puede observar que verifica la prueba de Homogeneidad con un nivel de significancia del 53%.

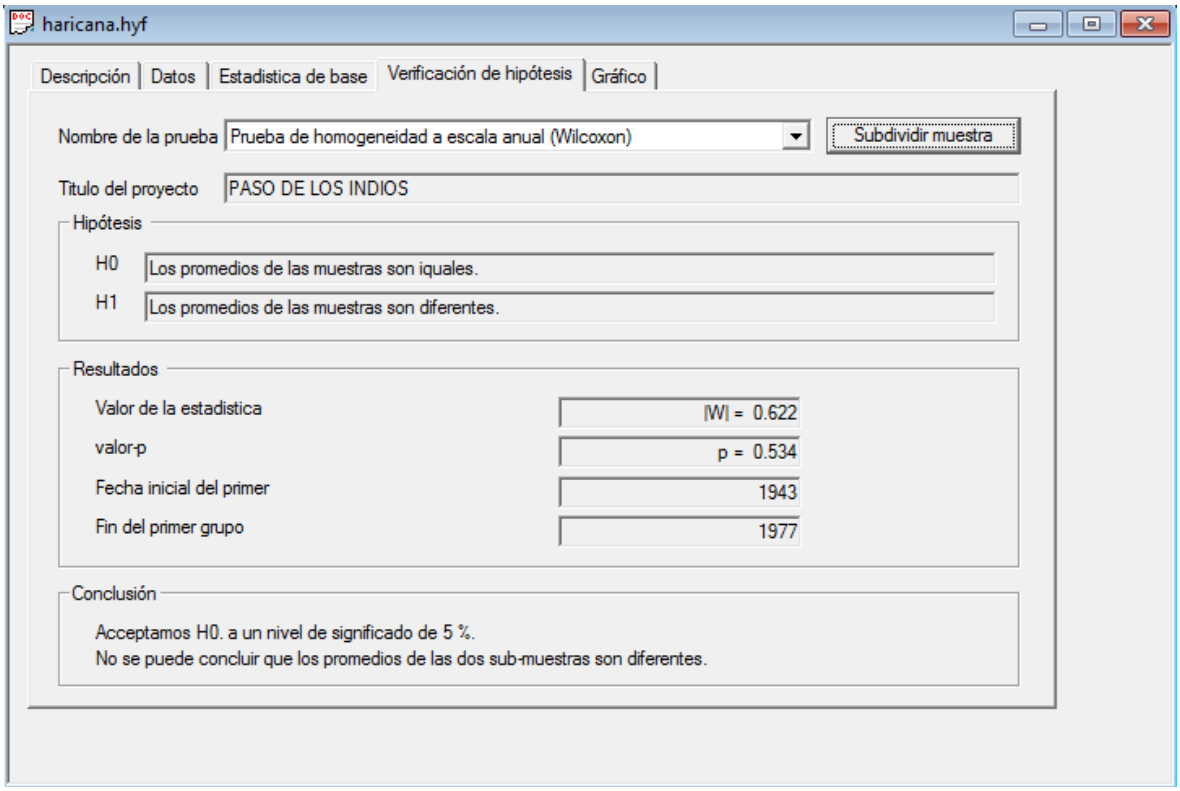


Figura 16: Salida del programa Hyfran para la prueba de homogeneidad a escala anual de la serie de máximos anuales de lluvia diaria de la estación Paso de los Indios en la Provincia de Neuquén (código 18).

4.4. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL.

En esta última parte del capítulo se analiza la muestra habiendo verificado todos los puntos anteriores, como una población (detallada en el capítulo II en el punto 2.3).

4.4.1. Ajuste de función de distribución de probabilidad.

Las funciones de distribución y métodos de ajuste ensayados fueron:

a) GEV (Método de Max. Verosimilitud).
b) Gumbel (Método de Max. Verosimilitud).
c) LogNormal (Método de Max. Verosimilitud).
d) GEV (Método de Momentos).
e) Gumbel (Método de Momentos).
f) LogPearson tipo III (Método de Momentos).

Debido a que este trabajo busca extender un análisis de regionalización de lluvias máximas diarias realizado en otras regiones de Argentina, es que se busca adoptar una misma función de distribución de probabilidades para representar las muestras de valores de lluvias diarias máximas anuales; se optó por la función LogNormal, que coincide con la estimación por el método de las normales. Se realizó un análisis de sensibilidad a esta decisión al comparar los resultados obtenidos con las otras funciones de distribución ajustadas con distintos métodos. Esto se muestra al final del capítulo.

Los ajustes antes mencionados se realizaron con el software Hyfran. Para ello, debía seleccionarse la pestaña “Ajuste” y elegir el método a utilizar, pudiendo ser “Método de Momentos” o “Método de Máxima Verosimilitud” y en algunos casos con método de momentos ponderados (esta última opción no fue seleccionada en ningún caso). En la Figura 17 y la Figura 18 se demuestra el procedimiento descripto.

Al realizar los ajustes, el programa, por defecto, selecciona 12 periodos de retorno diferentes (10.000, 2.000, 1.000, 200, 100, 50, 20, 5, 3, 2, 1.43) para realizar la estimación de láminas de lluvia diaria y sus intervalos de confianza. Además se incorporó manualmente el periodo de retorno de 25 años. Esto se llevaba a cabo seleccionando la pestaña “Otro periodo de regreso” y tipiando el valor a asignar (Figura 19).

Los resultados del análisis inferencial se copian y pegan en la tercera pestaña de la "Planilla Modelo", siendo esta denominada "Hyfran Población". Este procedimiento se realizó conjuntamente con el gráfico que muestra las lluvias máximas diarias (P (mm)) para cada periodo de retorno (Probabilidad de no-excedencia) y los intervalos de confianza. Además se realizó un test de "adecuación" de la distribución de probabilidades ensayadas a la muestra analizada. Este procedimiento se realizó para cada una de las opciones de función de distribución y modelo de ajuste seleccionado (Figura 20 y Figura 21).

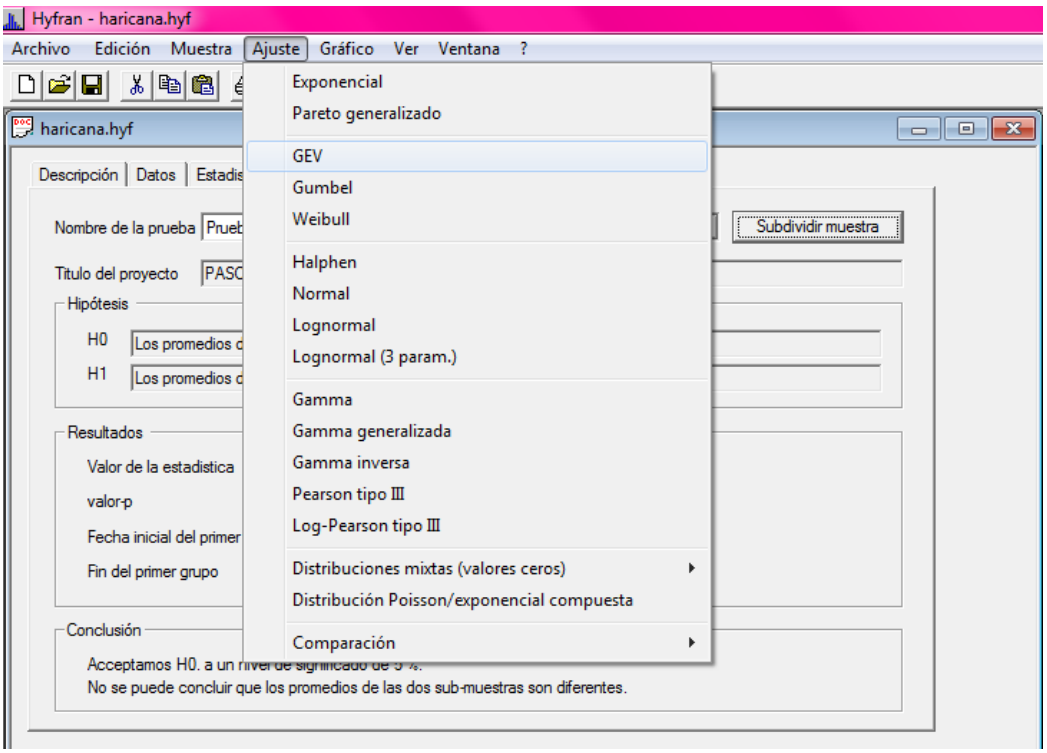


Figura 17: Captura de pantalla donde se indica la selección de la función de distribución de probabilidad

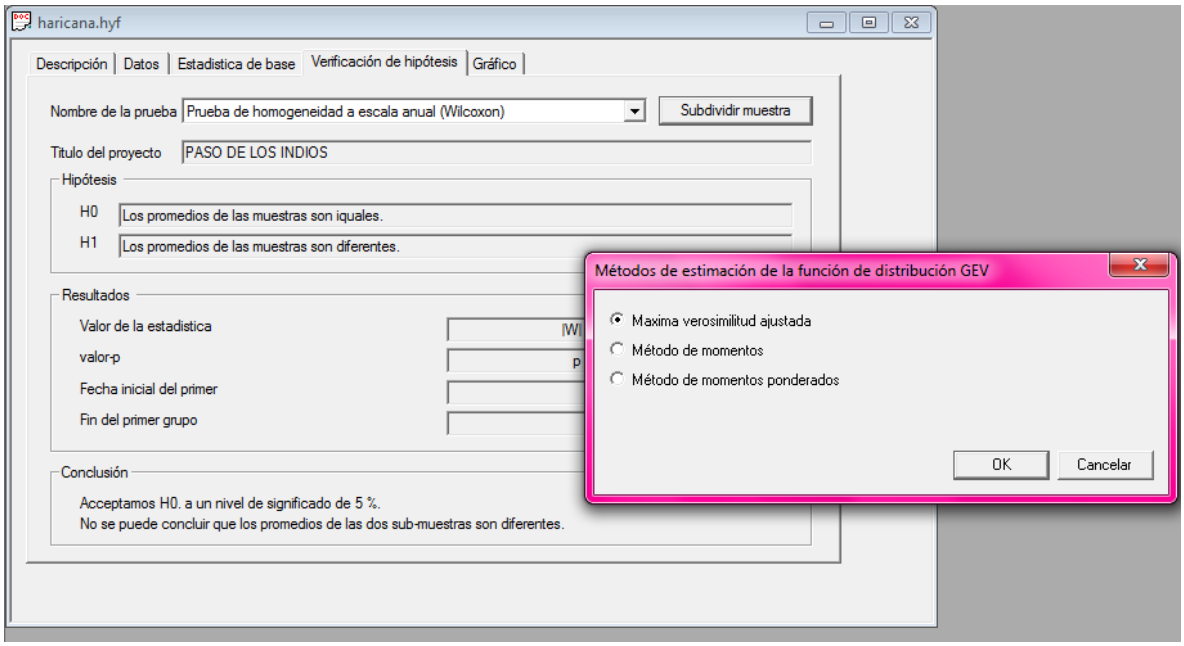


Figura 18: Captura de pantalla donde se indica la selección del método de ajuste de los parámetros de la función de distribución de probabilidad

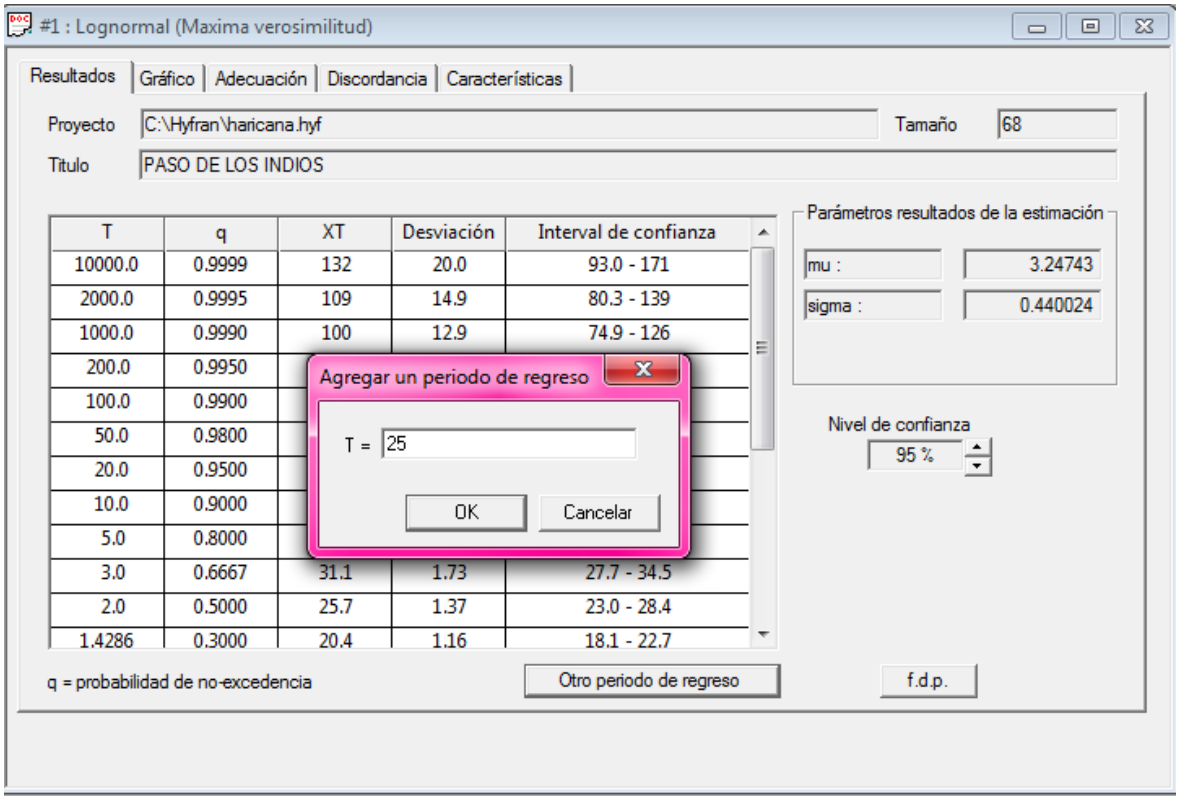


Figura 19: Captura de pantalla donde se indica la inclusión del periodo de retorno T=25 años

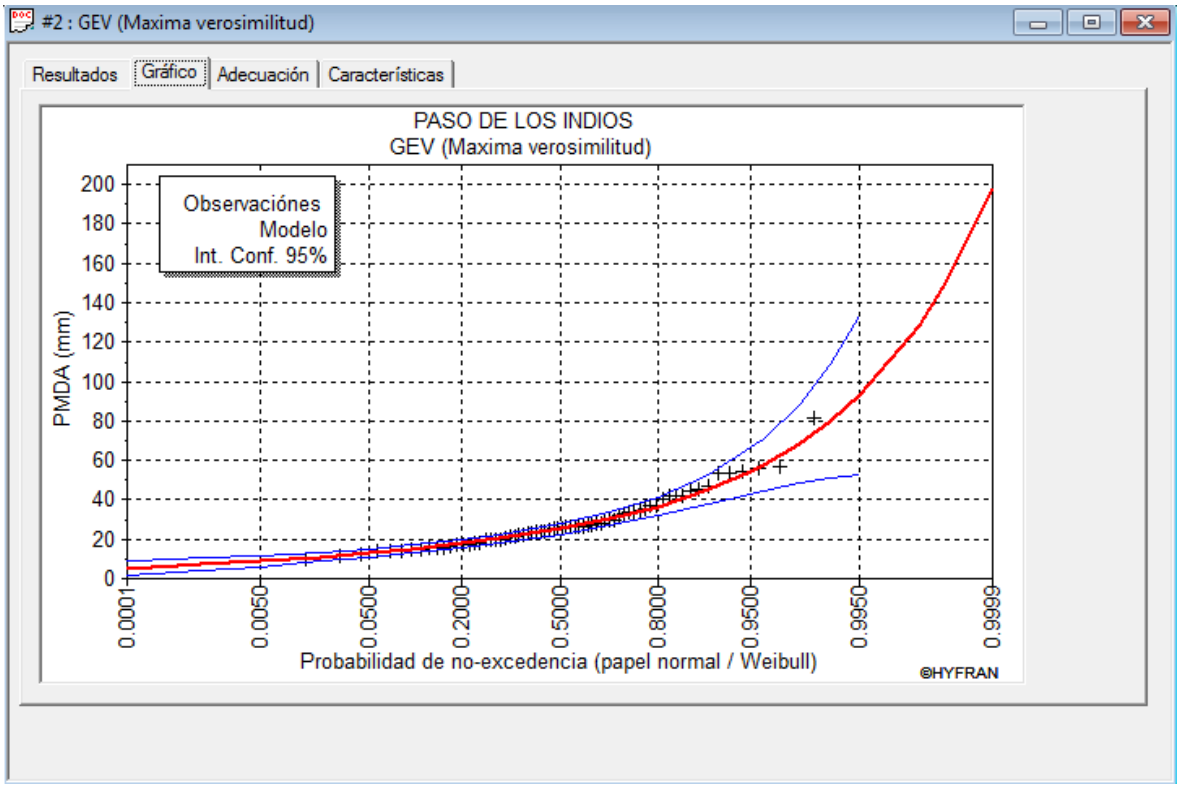


Figura 20: P (mm) vs Probabilidad de no-excedencia (incluyendo intervalos de confianza) estimada con la función de distribución de probabilidad GEV sobre la base de la región de estudio de la estación Paso de los Indios en la Provincia de Neuquén (código 18).

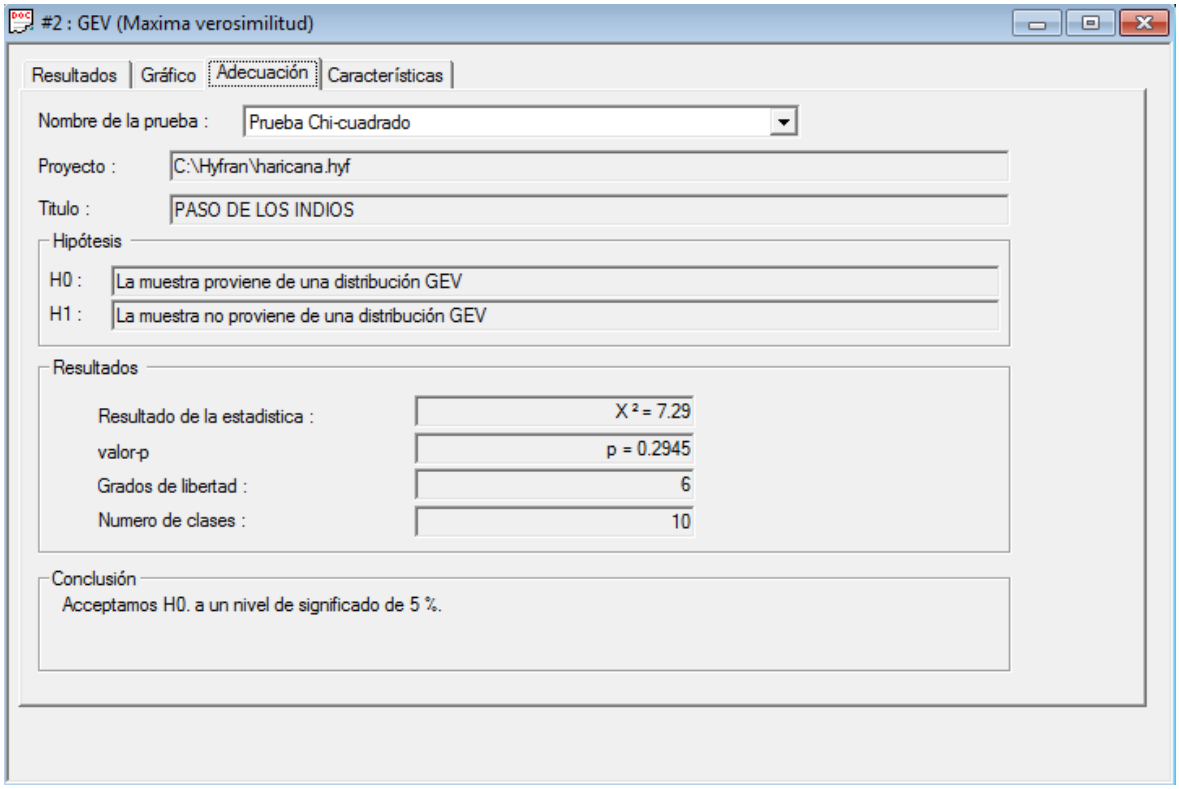


Figura 21: Test de adecuación para la función de distribución de probabilidad GEV sobre la base de la región de estudio de la estación Paso de los Indios en la Provincia de Neuquén (código 18).

De la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** a la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran los resultados del análisis inferencial realizado sobre los registros de la estación Paso de los Indios con las distintas distribuciones de probabilidades y métodos de estimación de parámetros.

PASO DE LOS INDIOS						
Resultados de ajuste						
GEV (Método de momentos)						
Numero de observaciones 68						
Parámetros						
alpha	10					
k	-0.042999					
u	22					
Quintiles						
q = F(X) : probabilidad de no-excedencia						
T = 1/(1-q)						
T	q	XT	Desviación e	Interval de confianza (95%)		
10000	0.9999	134	42.4	N/D	N/D	
2000	0.9995	111	24.8	N/D	N/D	
1000	0.999	102	18.8	N/D	N/D	
200	0.995	80.9	8.12	65	96.9	
100	0.99	72.4	4.84	63	81.9	
50	0.98	64.2	2.28	59.7	68.6	
25	0.96	56.1	0	55.5	56.6	
20	0.95	53.5	0	53.4	53.6	
10	0.9	45.6	1	43.5	47.6	
5	0.8	37.5	1	34.8	40.3	
3	0.6667	31.3	1	29	33.7	
2	0.5	25.9	1	24.5	27.2	
1	0.3	20.4	0	20.1	20.7	
1	0.2	17.6	1	16.2	19	
1	0.1	14.1	2	11.1	17.2	
1	0.05	11.7	2	7.3	16	
1	0.02	9.15	3	3.32	15	
1	0.01	7.64	3	0.84	14.4	
1	0.005	6.35	4	-1	14	
1	0.001	3.93	5	-5	13.3	
1	0.0005	3.06	5.13	-7	13.1	
1	0.0001	1	5.83	-10.1	12.8	

Tabla 9: Estimación de láminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad GEV (parámetros estimados por el método de momentos) sobre los registros de 68 años de la estación Paso de los Indios de la provincia de Neuquén (código 18).

PASO DE LOS INDIOS						
Resultados de ajuste						
Gumbel (Método de momentos)						
Numero de observaciones 68						
Parámetros						
u		22				
alpha		10				
Quintiles						
q = F(X) : probabilidad de no-excedencia						
T = 1/(1-q)						
T		q	XT	Desviación e	Interval de confianza (95%)	
	10000	0.9999	119	12.5	94.4	143
	2000	0.9995	102	10.3	81.7	122
	1000	0.999	94.7	9.42	76.2	113
	200	0.995	77.8	7.3	63.5	92.1
	100	0.99	70.5	6.4	58	83.1
	50	0.98	63.2	5.49	52.4	74
	25	0.96	55.8	4.59	46.8	64.8
	20	0.95	53.4	4.3	45	61.9
	10	0.9	45.9	3	39.2	52.6
	5	0.8	38	3	33.1	43
	3	0.6667	31.8	2	28.1	35.5
	2	0.5	26.2	2	23.2	29.1
	1	0.3	20.4	1	17.7	23.1
	1	0.2	17.3	1	14.5	20.2
	1	0.1	13.6	2	10.3	16.9
	1	0.05	10.8	2	7.06	14.6
	1	0.02	8.02	2	3.74	12.3
	1	0.01	6.31	2	1.69	10.9
	1	0.005	4.85	3	-0.0786	9.77
	1	0.001	2.07	3	-3.45	7.58
	1	0.0005	1.06	3	-4.67	6.8
	1	0.0001	-0.949	3	-7	5.24

Tabla 10: Estimación de láminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad GEV (parámetros estimados por el método de momentos) sobre los registros de 68 años de la estación Paso de los Indios de la provincia de Neuquén (código 18).

PASO DE LOS INDIOS						
Resultados de ajuste						
Log-Pearson tipo III (Método de momentos (BOB), basis = 10)						
Numero de observaciones 68						
Parámetros						
alpha		-123				
lambda		596				
m		6				
Quintiles						
q = F(X) : probabilidad de no-excedencia						
T = 1/(1-q)						
T		q	XT	Desviación e	Interval de confianza (95%)	
	10000	0.9999	129	66.3	N/D	N/D
	2000	0.9995	108	41.2	N/D	N/D
	1000	0.999	99.5	32.3	N/D	N/D
	200	0.995	80	16.4	N/D	N/D
	100	0.99	71.9	11.5	49.3	94.5
	50	0.98	63.9	7.83	48.6	79.3
	25	0.96	56	5	45.7	66.3
	20	0.95	53.5	5	44.3	62.7
	10	0.9	45.7	3	39	52.3
	5	0.8	37.6	3	32.4	42.8
	3	0.6667	31.4	2	27.2	35.6
	2	0.5	25.8	2	22.5	29
	1	0.3	20.3	1	17.8	22.7
	1	0.2	17.5	1	15	20
	1	0.1	14.2	2	11.2	17.3
	1	0.05	12	2	8.19	15.8
	1	0.02	9.85	2	5.3	14.4
	1	0.01	8.64	3	3.65	13.6
	1	0.005	7.65	3	2.33	13
	1	0.001	5.95	3	0.144	11.7
	1	0.0005	5.38	3	-1	11.3
	1	0.0001	4.35	3	-2	10.4

Tabla 11: Estimación de láminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad Log-Pearson tipo III (parámetros estimados por el método de momentos) sobre los registros de 68 años de la estación Paso de los Indios de la provincia de Neuquén (código 18).

PASO DE LOS INDIOS						
Resultados de ajuste						
GEV (Maxima verosimilitud)						
Numero de observaciones 68						
Parámetros						
alpha	9					
k	-0.151937					
u	22					
Quintiles						
q = F(X) : probabilidad de no-excedencia						
T = 1/(1-q)						
T	q	XT	Desviación estandar	Interval de confianza (95%)		
10000	0.9999	198	93.1	N/D	N/D	
2000	0.9995	147	53.3	N/D	N/D	
1000	0.999	129	40.9	N/D	N/D	
200	0.995	93.1	20.6	52.7	133	
100	0.99	80.2	14.7	51.3	109	
50	0.98	68.5	10.2	48.5	88.4	
25	0.96	57.9	7	44.7	71.2	
20	0.95	54.7	6	43.1	66.3	
10	0.9	45.3	4	37.9	52.8	
5	0.8	36.6	2	31.9	41.3	
3	0.6667	30.3	2	26.8	33.8	
2	0.5	25.1	1	22.4	27.9	
1	0.3	20.2	1	18.1	22.4	
1	0.2	17.8	1	15.8	19.8	
1	0.1	15	1	13.1	16.9	
1	0.05	13	1	10.9	15	
1	0.02	11.1	1	8.72	13.4	
1	0.01	9.91	1	7.33	12.5	
1	0.005	8.95	1	6	11.8	
1	0.001	7.18	2	4	10.6	
1	0.0005	7	1.84	2.96	10.2	
1	0.0001	5	2.08	1.26	9.43	

Tabla 12: Estimación de láminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad GEV (parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud) sobre los registros de 68 años de la estación Paso de los Indios de la provincia de Neuquén (código 18).

PASO DE LOS INDIOS						
Resultados de ajuste						
Gumbel (Maxima verosimilitud)						
Numero de observaciones 68						
Parámetros						
u		23				
alpha		10				
Quintiles						
q = F(X) : probabilidad de no-excedencia						
T = 1/(1-q)						
T		q	XT	Desviación e	Interval de confianza (95%)	
	10000	0.9999	110	8.82	92.8	127
	2000	0.9995	94.7	7.37	80.3	109
	1000	0.999	88.2	6.75	74.9	101
	200	0.995	72.8	5.31	62.4	83.3
	100	0.99	66.2	4.7	57	75.4
	50	0.98	59.6	4.08	51.6	67.6
	25	0.96	52.9	3.47	46.1	59.7
	20	0.95	50.8	3.28	44.3	57.2
	10	0.9	43.9	3	38.7	49.2
	5	0.8	36.8	2	32.7	40.9
	3	0.6667	31.1	2	27.9	34.4
	2	0.5	26	1	23.4	28.7
	1	0.3	20.8	1	18.5	23.1
	1	0.2	18	1	15.8	20.3
	1	0.1	14.6	1	12.2	17
	1	0.05	12.1	1	9.54	14.7
	1	0.02	9.58	1	6.75	12.4
	1	0.01	8.03	2	5.02	11
	1	0.005	6.7	2	3.51	9.88
	1	0.001	4.18	2	1	7.71
	1	0.0005	3.27	2	0	6.94
	1	0.0001	1	2	-3	5.39

Tabla 13: Estimación de láminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad Gumbel (parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud) sobre los registros de 68 años de la estación Paso de los Indios de la provincia de Neuquén (código 18).

PASO DE LOS INDIOS						
Resultados de ajuste						
Lognormal (Maxima verosimilitud)						
Numero de observaciones 68						
Parámetros						
mu		3				
sigma		0.440024				
Quintiles						
q = F(X) : probabilidad de no-excedencia						
T = 1/(1-q)						
T		q	XT	Desviación e	Interval de confianza (95%)	
	10000	0.9999	132	20	93	171
	2000	0.9995	109	14.9	80.3	139
	1000	0.999	100	12.9	74.9	126
	200	0.995	79.9	8.91	62.4	97.4
	100	0.99	71.6	7.4	57.1	86.1
	50	0.98	63.5	6.01	51.7	75.3
	25	0.96	55.6	4.74	46.3	64.9
	20	0.95	53.1	4.36	44.5	61.6
	10	0.9	45.2	3.27	38.8	51.6
	5	0.8	37.3	2	32.7	41.8
	3	0.6667	31.1	2	27.7	34.5
	2	0.5	25.7	1	23	28.4
	1	0.3	20.4	1	18.1	22.7
	1	0.2	17.8	1	15.6	19.9
	1	0.1	14.6	1	12.6	16.7
	1	0.05	12.5	1	10.5	14.5
	1	0.02	10.4	1	8.49	12.3
	1	0.01	9.24	1	7.37	11.1
	1	0.005	8.28	1	6.47	10.1
	1	0.001	6.6	1	4.93	8.27
	1	0.0005	6.05	1	4.43	7.66
	1	0.0001	5.01	1	4	6.49

Tabla 14: Estimación de láminas de lluvia máxima diaria (y sus intervalos de confianza) para distintos periodos de retorno inferidos con la distribución de probabilidad LogNormal (parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud) sobre los registros de 68 años de la estación Paso de los Indios de la provincia de Neuquén (código 18).

Se destaca en los resultados reportados en las tablas precedentes la importancia de la amplitud de los intervalos de confianza para los valores de la variable analizada independientemente de la función de la distribución utilizada. Se puede observar en las planillas de cada ajuste que, a medida que aumenta el periodo de retorno, aumenta de forma considerable la diferencia entre el límite superior y el límite inferior lo que define el intervalo de confianza de la predicción de la lámina de lluvia diaria (Figura 22).

Este aumento del intervalo que se observa, del valor estimado, es debido a que la longitud de la serie histórica, en años, es mucho menor al periodo de retorno analizado. La bibliografía aconseja que la cantidad de años en los cuales se puede realizar una extrapolación confiable es igual a cuatro veces la cantidad de datos obtenidos; es decir, que para un registro de 20 años puede realizarse una extrapolación viable de hasta 80 años (probabilidad de no excedencia= 0,99); a partir de ese punto aumenta la incertidumbre de los valores obtenidos por los métodos de ajuste. Esto es recomendable al definir el periodo de retorno conveniente para el diseño de una obra, por lo que nuestro análisis sólo llega hasta los 100 años, con lo cual será válido para el cálculo de caudales de pequeñas y medianas obras.

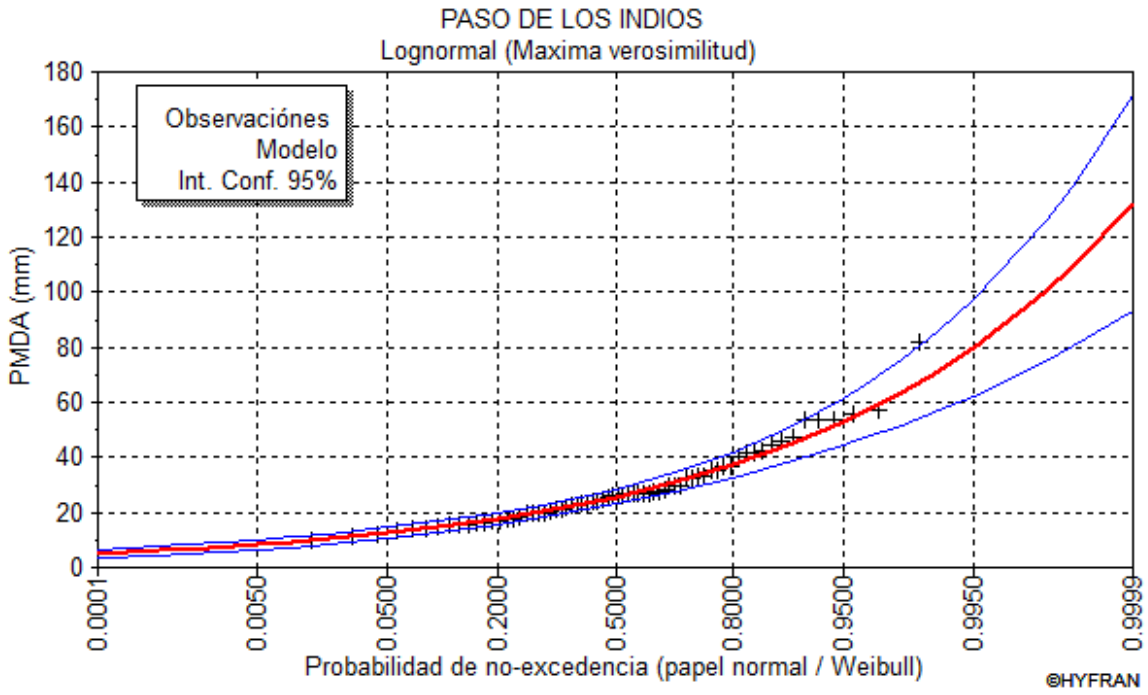


Figura 22: P (mm) vs Probabilidad de no-excedencia (incluyendo intervalos de confianza) estimada con la función de distribución de probabilidad LogNormal sobre la base de la región de estudio de la estación Paso de los Indios de la provincia de Neuquén (código 18)

4.4.2. Contraste entre los valores de lluvia máxima estimadas con distintas funciones de distribución y métodos de ajuste.

Para finalizar el análisis se creó una planilla (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) en donde se resumen los valores de láminas de lluvia para los distintos periodos de retorno con las distintas funciones de distribución y métodos de ajuste de los parámetros.

	Precipitación Máxima Diaria Esperada para T(mm)					
	GEV		Gumbel		LogNormal	LogPearson III
Tr	(M verosimilitud)	(Momentos)	(M verosimilitud)	(Momentos)	(M verosimilitud)	(Momentos)
100	80.20	72.40	66.20	70.50	71.60	71.90
50	68.50	64.20	59.60	63.20	63.50	63.90
25	57.90	56.10	52.90	55.80	55.60	56.00
20	54.70	53.50	50.80	53.40	53.10	53.50
10	45.30	45.60	43.90	45.90	45.20	45.70
5	36.60	37.50	36.80	38.00	37.30	37.60

Tabla 15: Contraste entre los valores de lluvia máxima estimadas con distintas funciones de distribución y métodos de ajuste

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se compara en forma relativa el porcentaje de variación de los distintos valores estimados para el mismo periodo de retorno de la función LogNormal con método de ajuste de Máxima Verosimilitud, ya que como se mencionó anteriormente, debido a que este trabajo busca extender un análisis de regionalización de lluvias máximas diarias realizado en otras regiones de Argentina, es que se adopta a priori la función de distribución LogNormal con parámetros ajustados por el método de Máxima Verosimilitud para representar las muestras de valores de lluvias diarias máximas anuales. Aun así se realizó un análisis de sensibilidad a esta decisión al comparar los resultados obtenidos con las otras funciones de distribución ajustadas con distintos métodos.

	Porcentaje de variación % respecto a Log Normal					
	GEV		Gumbel		LogNormal	LogPearson III
Tr	(M verosimilitud)	(Momentos)	(M verosimilitud)	(Momentos)	(M verosimilitud)	(Momentos)
100	89.3%	98.9%	92.5%	98.5%	100.0%	99.6%
50	92.7%	98.9%	93.9%	99.5%	100.0%	99.4%
25	96.0%	99.1%	95.1%	99.6%	100.0%	99.3%
20	97.1%	99.3%	95.7%	99.4%	100.0%	99.3%
10	99.8%	99.1%	97.1%	98.5%	100.0%	98.9%
5	98.1%	99.5%	98.7%	98.2%	100.0%	99.2%

Tabla 16: Contraste relativo de los distintos valores estimados con distintas funciones de distribución (con respecto a los valores estimados con la función de distribución LogNormal)

Se puede verificar en la tabla anterior, para períodos menores a los 50 años, las diferencias resultantes según las diferentes funciones de distribución respecto al LogNormal son menores al 5%. Mientras que para un período de retorno de 100 años, la diferencia resultante es levemente mayor (10.7%).

4.4.3. Contraste entre las distintas funciones de ajuste por Métodos de Momentos y Método de Máxima Verosimilitud.

Para concluir con estas pruebas se compararon en un mismo gráfico (Figura 23 y Figura 24) las distintas funciones de distribución de probabilidad utilizadas. Se observó que hasta para un período de retorno de 200 años inclusive (Para una probabilidad de no-

excedencia de 0,995) las diferencias entre las distintas funciones propuestas no son significativas.

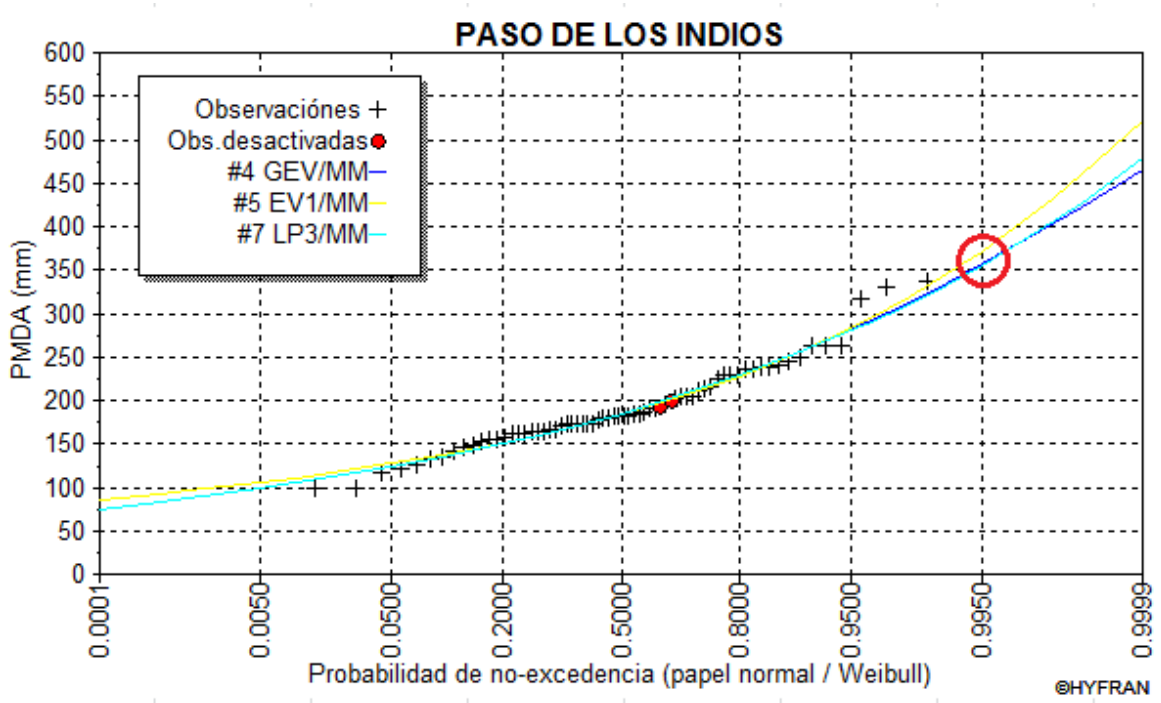


Figura 23: Comparación entre estimaciones realizadas con distintas funciones de distribución de probabilidad y parámetros ajustados con el método de momentos

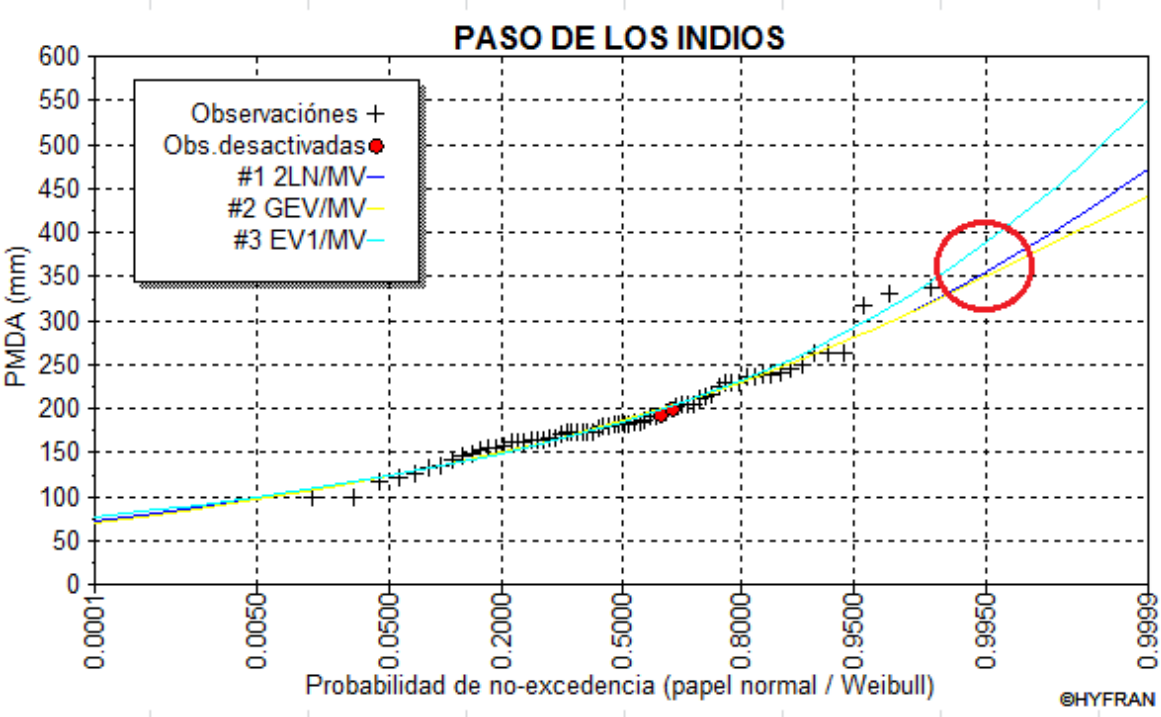


Figura 24: Comparación entre estimaciones realizadas con distintas funciones de distribución de probabilidad y parámetros ajustados con el método de verosimilitud

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA EL CONJUNTO DE ESTACIONES SELECCIONADAS.

En este apartado se busca sintetizar los resultados más relevantes de la información de todas las estaciones analizadas de Neuquén y Rio Negro (capítulo IV).

5.1. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS ESTADÍSTICAS EN LAS SERIES DE LLUVIAS MÁXIMAS.

En esta sección se determinan cuáles fueron las estaciones que no pasaron (es decir, que fueron rechazadas a un nivel de significancia del 1%) las pruebas de hipótesis estadísticas.

5.1.1. Detección de presencia de Datos Atípicos.

En caso de que se detecten datos atípicos el procedimiento consiste en depurar el dato atípico y volver a realizar el análisis; en caso de no encontrar datos atípicos nuevamente la prueba verifica y se continúa. En caso contrario y al detectar un segundo dato atípico se descarta la estación.

En la provincia de Neuquén una de las estaciones procesadas presentó datos atípicos al realizarse el segundo análisis. Mientras que en la provincia de Rio Negro dos estaciones procesadas presentaron datos atípicos al realizarse el segundo análisis.

5.1.2. Prueba de Independencia.

De las 59 estaciones de Neuquén y Rio Negro de las cuales se partió, una sola estación no pasó esta prueba, lo cual constituye el 1.7% de las estaciones con una longitud mayor a 14 años. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra la estación que no verificó esta prueba.

Codigo	Estacion Pluviometrica	Longitud de la Serie	Latitud	Longitud
43	Gutierres- Los Cohihues	43	-41.157	-71.397

Tabla 17: Estación Pluviométrica que no verificó la Prueba de Independencia de sus valores máximos diarios de Rio Negro

5.1.3. Prueba de Estacionariedad.

Las estaciones que verificaron las anteriores pruebas y con longitud de serie mayor a 14 años fueron sometidas a la Prueba de Estacionariedad (Kendall). Habiendo 1 estación que no verifico esta prueba, la cual se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

Codigo	Estacion Pluviometrica	Longitud de la Serie	Latitud	Longitud
34	Villegas-Ruta Nacional N°258	31	-41.580	-71.500

Tabla 18: Estación Pluviométrica que no verifico la Prueba de Estacionariedad de sus valores máximos diarios de Rio Negro

5.1.4. Prueba de Homogeneidad a Escala Anual.

Las estaciones restantes fueron sometidas a la Prueba de Homogeneidad (Wilcoxon) de sus registros históricos.

Con respecto a las estaciones pertenecientes a la Provincia de Neuquén y Rio Negro no verificaron dos de ellas:

Codigo	Estacion Pluviometrica	Longitud de la Serie	Latitud	Longitud
34	Villegas-Ruta Nacional N°258	31	-41.580	-71.500
43	Gutierres-Los Cohihues	37	-41.157	-71.397

Tabla 19: Estaciones Pluviométricas que no verificaron la Prueba de Homogeneidad de sus valores máximos diarios de Rio Negro.

Por lo tanto, se concluye que de las 59 estaciones pluviométricas con las que se inició el análisis en Neuquén y Rio Negro, 54 pasaron las pruebas mencionadas. Pero si tenemos en cuenta que 9 de ellas no cumplen con el mínimo de longitud de serie, destacamos que el presente trabajo se realizó con 45 estaciones, representando éstas el 76.27% del total.

5.1.5. Contraste entre los valores de lluvia máxima estimadas con distintas funciones de distribución y métodos de ajuste para 100 años de periodo de retorno con respecto a la Distribución Log Normal.

A continuación se analiza la evolución con la longitud de la serie de la máxima diferencia porcentual entre la función Lognormal y la función de distribución que más se aleja de esta para T=100 años. Se puede observar en la Figura 25 que a medida que crecen las longitudes de serie, la máxima diferencia de algunos valores estimados con otras funciones de distribución con respecto a la Lognormal disminuye.

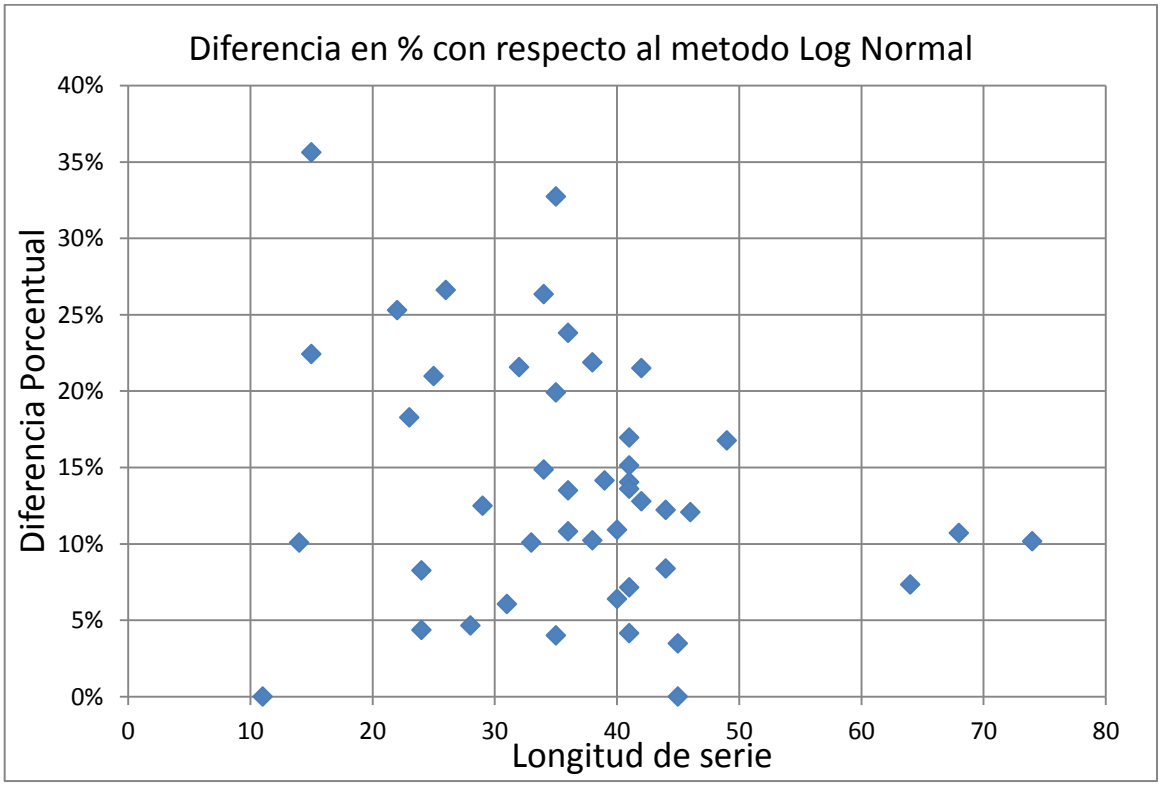


Figura 25: Evolución de la máxima diferencia porcentual entre los valores estimados con la distribución LogNormal y alguna función de distribución a medida que aumenta la longitud de la serie para las estaciones analizadas hasta la actualidad.

Para analizar la importancia relativa de la selección de la función de distribución óptima se grafica la máxima diferencia porcentual entre el valor de lluvia del método Lognormal y el valor proporcionado por el método que más se aleja de esta función versus la incertidumbre porcentual del método Lognormal; ambas variables para T=100 años (caso más desfavorable). En este análisis se compara la diferencia porcentual mostrada en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** con los intervalos de confianza. En la Figura 26 se puede ver el análisis realizado.

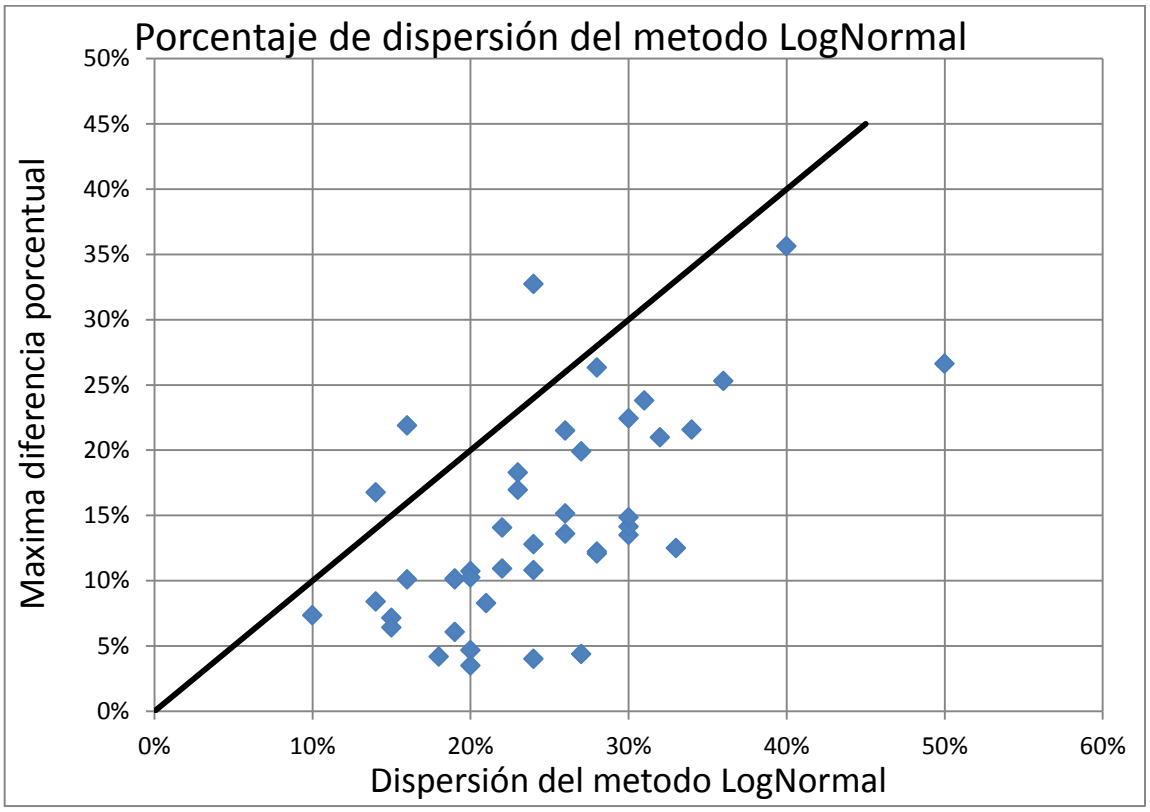


Figura 26: Máxima diferencia porcentual entre el valor de lluvia del método Lognormal y el valor proporcionado por el método que más se aleja de esta función versus la dispersión porcentual del método Lognormal para T=100 años

Visualizando esta última figura se observa que casi en la totalidad de los casos la incertidumbre relativa a estimar los valores de lámina con la función de distribución Lognormal es mayor que la máxima diferencia porcentual entre Lognormal y la función de distribución que más se aleja de esta; por lo que es correcto seleccionar a la función Lognormal como la que define la relación entre la lámina de lluvia precipitada y el tiempo de retorno.

Del análisis de las imágenes anteriores, para un período de retorno para 100 años (T=100), se muestra que el intervalo de confianza de LogNormal, comprende entre sus límites, a todas las funciones de distribución. Por lo que no se incurre en un error significativo al adoptar esta distribución (LogNormal). Esto se demuestra al quedar casi todos los valores por debajo de la recta de 45 grados en las figuras (solo tres se encuentran por encima).

5.2. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.

A continuación se presenta una tabla resumen con los datos estadísticos más importantes – Valor máximo de lámina de lluvia anual, Media y Desvío – de las estaciones finalmente seleccionadas (Tabla 20).

Codigo	Nombre de la estación	Provincia	Serie	Máximo	Media(Ln)	Desvío(Ln)
1	Pichi Neuquén	Neuquén	36	158	4.353827	0.372895
2	Varvarco	Neuquén	42	150	4.283086	0.436953
3	Las Ovejas	Neuquén	42	190	4.466999	0.407962
4	Cajon Carileuvu	Neuquén	41	130	4.027724	0.428978
5	Tricao Malal	Neuquén	41	101.5	3.943686	0.366934
6	Buta Ranquil	Neuquén	45	77.3	3.506350	0.346415
7	Andacollo	Neuquén	40	110	3.916846	0.369004
8	Los Miches	Neuquén	41	139.2	4.268780	0.390077
9	El Alamito	Neuquén	41	98.8	3.704673	0.420458
10	Chos Malal	Neuquén	36	72.5	3.473937	0.460079
11	Auquinco	Neuquén	36	113	3.594424	0.484317
12	Estancia Chacayco	Neuquén	33	112	4.277501	0.249998
13	Chochoy Mallin	Neuquén	41	110.3	4.002596	0.317497
14	Vilu Mallin	Neuquén	29	135	4.055989	0.458730
15	El Cholar	Neuquén	35	180	4.179795	0.408488
16	El Huecu	Neuquén	39	170.3	4.159111	0.499383
17	Chorriaca	Neuquén	24	90	3.793627	0.342127
18	Paso De Indios	Neuquén	68	81.8	3.247427	0.440024
19	Las Lajas	Neuquén	32	110	3.580447	0.517403
20	Estancia Tres Picos	Neuquén	28	127	4.313553	0.280113
21	Malleo	Neuquén	22	150	4.215526	0.447072
23	Oficina Tecnica	Rio Negro	41	90.6	4.027238	0.263823
26	El Azul	Rio Negro	44	118.3	4.207535	0.250006
27	Ñorquinco	Rio Negro	34	75.5	3.328619	0.421526
30	Cerro Mesa	Rio Negro	44	90.9	3.172722	0.494280
32	Las Bayas	Rio Negro	26	110	3.189738	0.677994
33	Poblador Turra	Rio Negro	25	97.6	3.759518	0.414887
36	Manso Inferior	Rio Negro	40	106.8	4.202974	0.241340
38	Muelle	Rio Negro	23	150	4.352661	0.287811
39	Central Frey	Rio Negro	24	114.2	4.282861	0.262038
40	Los Moscos	Rio Negro	15	125	4.405677	0.300925
41	Los Alerces	Rio Negro	49	151.4	4.301287	0.271754
44	San Carlos De Bariloche	Rio Negro	14	87	4.242351	0.183778
46	Pichi Mahuida	Rio Negro	37	136	4.189734	0.426489
49	Viedma - DPA	Rio Negro	14	135.4	4.113739	0.534324
50	Catriel	Rio Negro	15	106	3.765085	0.407840
51	Guerrico	Rio Negro	46	94.1	3.486929	0.506684
52	Nahuel Huapi	Neuquén	38	76	3.693946	0.355527
53	Estancia La Lonja	Neuquén	35	92.5	3.786831	0.402850
54	Clemente Onelli	Rio Negro	34	80	3.264512	0.496569
55	Salmonicultura	Neuquén	31	112	4.196098	0.295628
56	Cuyin Manzano	Neuquén	38	136	4.261530	0.265580
57	EA San Pedro	Rio Negro	35	74	3.303435	0.405244
58	EA Quechuquina	Neuquén	64	167	4.566810	0.230225
59	EA Las Bayas	Rio Negro	74	127.1	3.571121	0.470617

Tabla 20: Datos de estadística descriptiva de las series de lluvias diarias máximas anuales finalmente seleccionadas de Neuquén y Rio Negro

5.3. ANÁLISIS DE ESTADÍSTICA INFERENCIAL.

Se conformó una tabla resumen con los valores de distribución de probabilidad empírica para los periodos de retorno T= 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años de las estaciones finalmente seleccionadas (Tabla 21). Además, en la misma se describe su nombre.

Codigo	Nombre de la estación	Provincia	Serie	PMD_2	PMD_5	PMD_{10}	PMD_{20}	PMD_{25}	PMD_{50}	PMD_{100}
1	Pichi Neuquén	Neuquén	36	77.8	106	125	144	149	167	185
2	Varvarco	Neuquén	42	72.5	105	127	149	156	178	200
3	Las Ovejas	Neuquén	42	87.1	123	147	170	178	201	225
4	Cajon Carileuvu	Neuquén	41	56.1	80.5	97.3	114	119	135	152
5	Tricao Malal	Neuquén	41	51.6	70.3	82.6	94.4	98.1	110	121
6	Buta Ranquil	Neuquén	45	33.3	44.6	52	58.9	61.1	67.9	74.6
7	Andacollo	Neuquén	40	50.2	68.5	80.6	92.2	95.9	107	119
8	Los Miches	Neuquén	41	71.4	99.2	118	136	141	159	177
9	El Alamito	Neuquén	41	40.6	57.9	69.7	81.2	84.9	96.4	108
10	Chos Malal	Neuquén	36	32.3	47.5	58.2	68.8	72.2	83	94.1
11	Auquinco	Neuquén	36	36.4	54.7	67.7	80.7	85	98.4	112
12	Estancia Chacayco	Neuquén	33	72.1	88.9	99.3	109	112	120	129
13	Chochoy Mallin	Neuquén	41	54.7	71.5	82.2	92.3	95.4	105	115
14	Vilu Mallin	Neuquén	29	57.7	84.9	104	123	129	148	168
15	El Cholar	Neuquén	35	65.4	92.2	110	128	134	151	169
16	El Huecu	Neuquén	39	64	97.4	121	146	153	179	205
17	Chorriaca	Neuquén	24	44.4	59.2	68.9	78	80.9	89.7	98.5
18	Paso De Indios	Neuquén	68	25.7	37.3	45.2	53.1	55.6	63.5	71.6
19	Las Lajas	Neuquén	32	35.9	55.5	69.7	84.1	88.8	104	120
20	Estancia Tres Picos	Neuquén	28	74.7	94.6	107	118	122	133	143
21	Malleo	Neuquén	22	67.7	98.7	120	141	148	170	192
23	Oficina Tecnica	Rio Negro	41	56.1	70.1	78.7	86.6	89.1	96.5	104
26	El Azul	Rio Negro	44	67.2	82.9	92.6	101	104	112	120
27	Ñorquinco	Rio Negro	34	27.9	39.8	47.9	55.8	58.4	66.3	74.4
30	Cerro Mesa	Rio Negro	44	23.9	36.2	45	53.8	56.7	65.9	75.4
32	Las Bayas	Rio Negro	26	24.3	43	57.9	74.1	79.6	97.8	118
33	Poblador Turra	Rio Negro	25	42.9	60.9	73.1	85	88.8	101	113
36	Manso Inferior	Rio Negro	40	66.9	81.9	91.1	99.5	102	110	117
38	Muelle	Rio Negro	23	77.7	99	112	125	129	140	152
39	Central Frey	Rio Negro	24	72.4	90.3	101	111	115	124	133
40	Los Moscos	Rio Negro	15	81.9	106	120	134	139	152	165
41	Los Alerces	Rio Negro	49	73.8	92.8	105	115	119	129	139
44	San Carlos De Bariloche	Rio Negro	14	69.6	81.2	88.1	94.1	96	101	107
46	Pichi Mahuida	Rio Negro	37	66	94.5	114	133	139	159	178
49	Viedma - DPA	Rio Negro	14	61.2	95.9	121	147	156	183	212
50	Catriel	Rio Negro	15	43.2	60.8	72.8	84.4	88.2	99.8	112
51	Guerrico	Rio Negro	46	32.7	50.1	62.6	75.2	79.4	92.6	106
52	Nahuel Huapi	Neuquén	38	40.2	54.2	63.4	72.2	74.9	83.5	91.9
53	Estancia La Lonja	Neuquén	35	44.1	61.9	73.9	85.6	89.3	101	113
54	Clemente Onelli	Rio Negro	34	26.2	39.7	49.5	59.2	62.4	72.6	83.1
55	Salmonicultura	Neuquén	31	66.4	85.2	97	108	111	122	132
56	Cuyin Manzano	Neuquén	38	70.9	88.7	99.7	110	113	122	132
57	EA San Pedro	Rio Negro	35	27.2	38.3	45.7	53	55.3	62.5	69.9
58	EA Quechuquina	Neuquén	64	96.2	117	129	141	144	154	164
59	EA Las Bayas	Rio Negro	74	35.6	52.8	65	77.1	81.1	93.5	106

Tabla 21: Valores de lluvias máximas diarias (PMD) estimadas para distintos períodos T (2, 5, 10, 20, 25, 50, 100) para las estaciones finalmente seleccionadas de Neuquén y Rio Negro

Finalmente para contrastar se muestra la Figura 27 la cual contiene sólo las estaciones que verificaron las pruebas de hipótesis de estadísticas básicas y que fueron analizadas con estadística inferencial.

Podemos observar la distribución espacial de las estaciones, concentrándose al Oeste de la provincia de Neuquén la mayoría y disminuyendo hacia el Este. Respecto a la provincia de Rio Negro observamos una concentración al Suroeste.

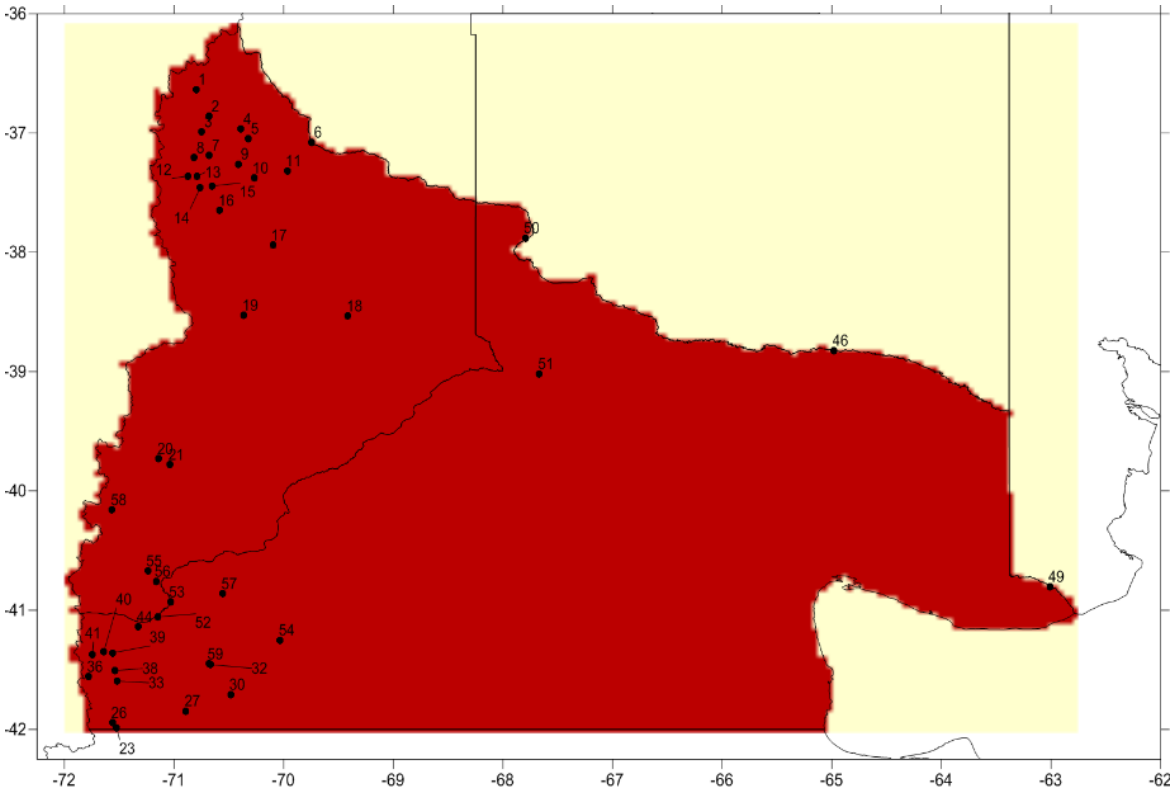


Figura 27: Estaciones finalmente seleccionadas de Neuquén y Rio Negro

6. REGIONALIZACION.

6.1. INTRODUCCION.

Se procedió a ubicar espacialmente las distintas estaciones pluviométricas y regionalizar los valores de lámina de lluvia para los distintos periodos de retorno, para luego, mediante el empleo de técnicas de análisis espacial poder interpolar la información puntual con el objeto de generar grillas de información pluviométrica.

En este proceso se utilizó un Sistema de Información Geográfica (*SIG*), el cual es definido como un sistema asistido por computadora para la adquisición, almacenamiento, procesamiento, análisis y visualización de datos geográficos. En la actualidad, se encuentran disponibles una gran variedad de herramientas y paquetes computacionales para asistir estas tareas. El paquete computacional elegido fue el Idrisi Selva, el cual permite generar un archivo vectorial o de tipo raster georeferenciado.

6.2. CREACION DE UNA BASE DE DATOS.

Para la conformación de la base de datos empleada se recurre al paquete computacional IDRISI Selva, con el cual es posible transformar datos numéricos en un archivo digital. La gran virtud de este sistema es la facilidad con la que se puede relacionar información y referenciarla mediante coordenadas al espacio. A continuación se detallan los pasos seguidos para la elaboración de la base de datos con el programa de referencia.

1. Se realiza una hoja de cálculo, en la cual se visualiza el nombre de las estaciones junto a su código, coordenadas geográficas, parámetros estadísticos, lluvia máxima diaria anual para los distintos periodos de retorno, juntos con sus intervalos de confianza, además de otra información relevante como longitud de serie, departamento, etc.
2. Con la información ya organizada, se prosigue a incorporarla al programa IDRISI Selva. Para ello, es necesario crear una nueva Bases de Datos, en el menú GIS Analysis se elige la opción DatabaseQuery y luego DatabaseWorkshop (Figura 28) o bien a través del menú Data Entry. En forma directa se podrá hacer clic sobre el icono en la barra de herramientas.
3. Una vez abierto el cuadro de diálogo, se debe crear un nuevo archivo, para lo cual, en el menú File se selecciona la opción New y se le asigna un nombre.
4. A continuación, se debe importar la planilla de Excel previamente tabulada. En el cuadro de diálogo de DatabaseWorkshop, en el menú File seleccionar la opción Import, Table y posteriormente from External File (Figura 29). Finalmente, se debe guardar con la opción Save del menú File.

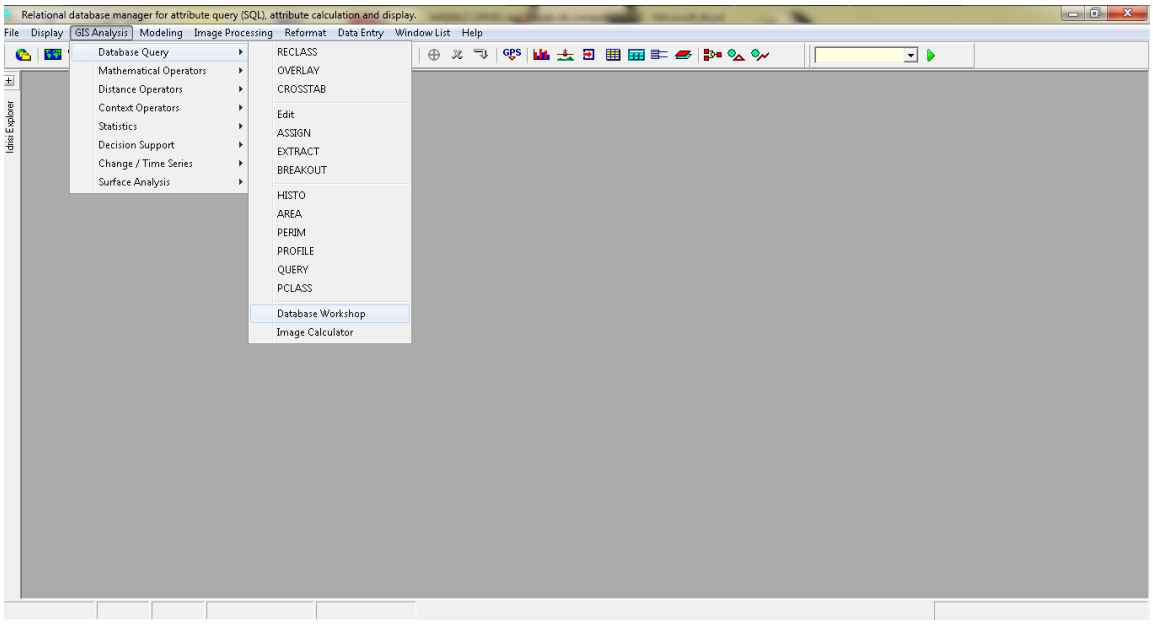


Figura 28: Cuadro de diálogo DatabaseWorkshop

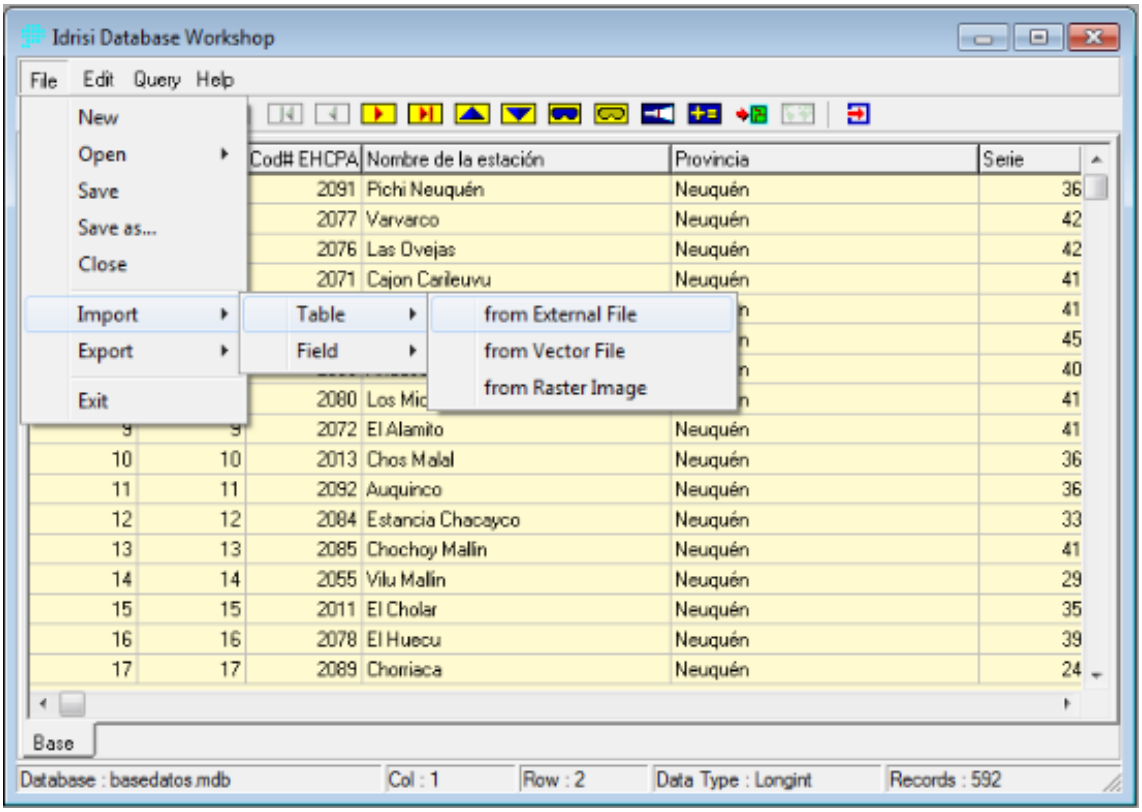


Figura 29: Cuadro de diálogo DatabaseWorkshop – Import

6.3. CREACION DE ARCHIVO VECTORIAL Y DE VALORES

Disponiendo de la base de datos, es necesario crear un archivo de tipo vector punto para posteriormente generar una Imagen Digital. Los archivos de puntos se utilizan para representar características, donde sólo tiene importancia la ubicación. Cada característica de punto se describe con un valor de atributo, que puede ser entero o real, y con un par de coordenadas (*X*, *Y*). En nuestro caso, cada punto representa una de las estaciones pluviométrica y los atributos asignados son los distintos valores Mínimos, Medios y Máximos esperados de lluvia máxima diaria anual para recurrencias de 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años.
Un archivo de valores es un archivo muy simple que contiene los valores para un solo atributo. Se almacena en un formato de texto ASCII y consiste en dos columnas de datos separadas por uno o más espacios. La primer columna contiene un identificador que puede usarse para asociar el valor con una característica tanto raster como vectorial, mientras que la segunda contiene el valor del atributo. Los archivos con valores de atributo tienen una extensión .avl. Dichos archivos pueden ser importados o exportados desde o hacia una tabla de base de datos usando el Taller de Bases de Datos.

1. En primer lugar, se debe abrir la base de datos. Para ello, desde el menú File se elige la opción Open y se selecciona Database File.
2. Una vez visualizada la base datos correspondiente, nuevamente en el menú File, se escoge la opción Export y se selecciona Field, X Y to Point Vector File (Figura 30). Se genera de esta manera la Figura 31.
3. Luego se debe abrir el cuadro de diálogo Export Vector File (Figura 32). En el presente trabajo se adopta el sistema de coordenadas (*X*, *Y*) de latitud y longitud con el cual se ubican las estaciones pluviométricas. Por esta razón se utiliza el sistema de referencia LATLONG equivalente al WSG1984 y grados como unidades de referencia.
4. Luego se debe establecer un vector de enlace. Para ello se debe hacer clic en el ícono para abrir el cuadro de diálogo de Establish a Display Link, (Figura 33).

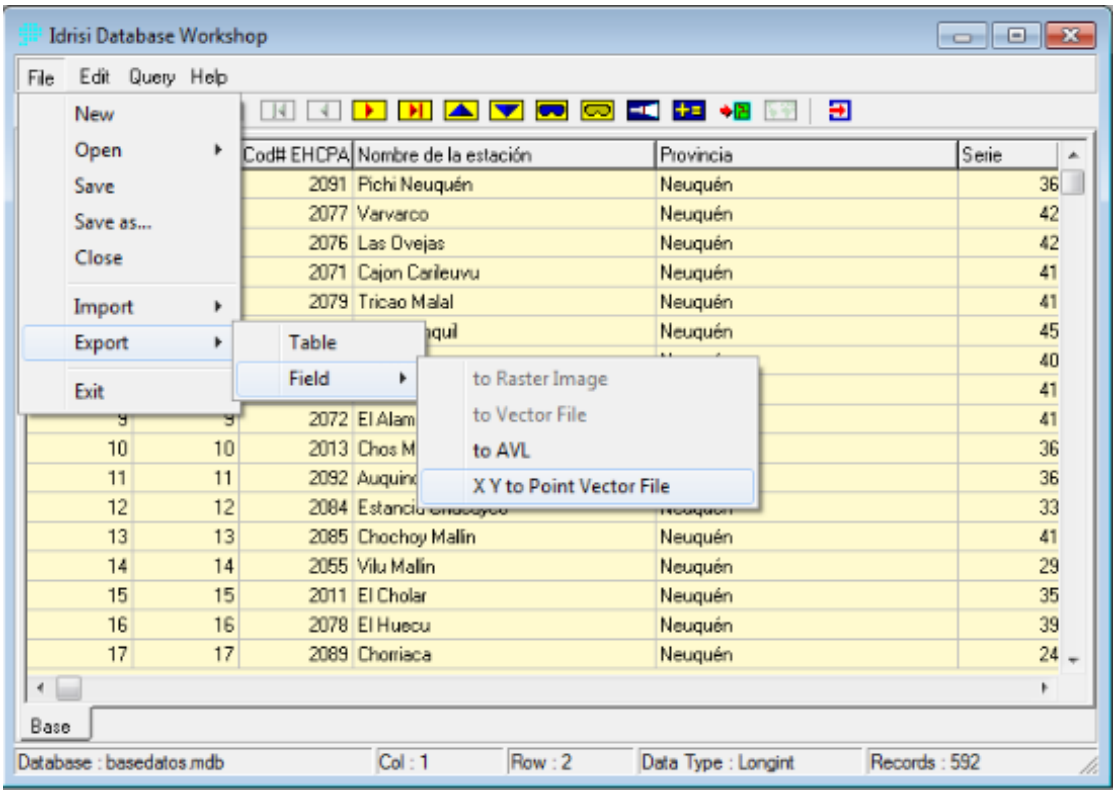


Figura 30: Cuadro de Diálogo Database Workshop – Export

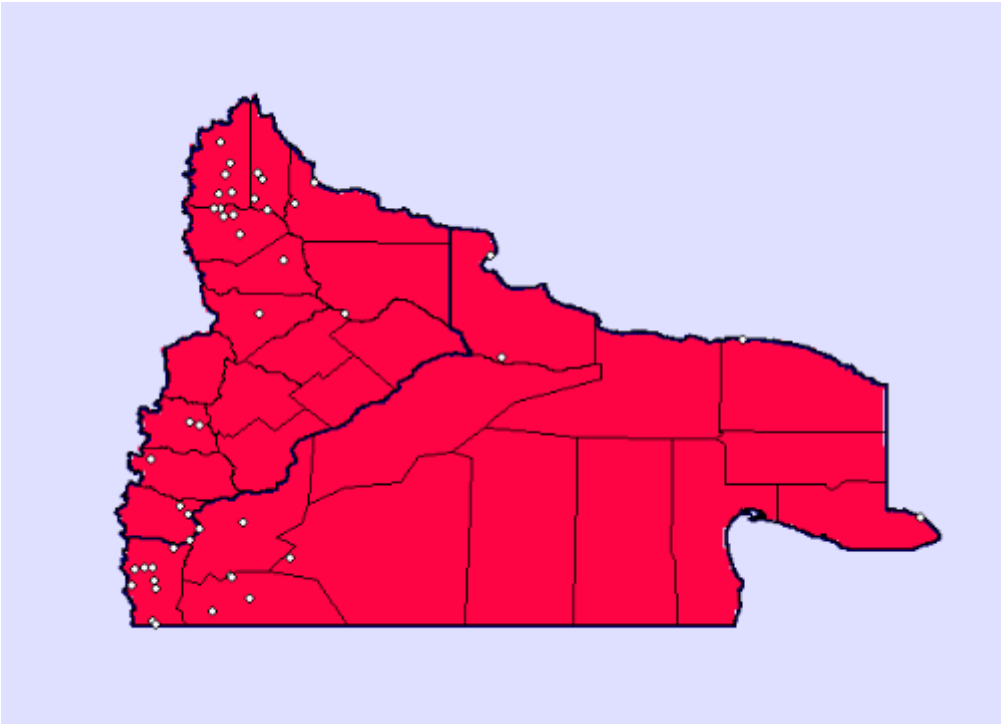


Figura 31: Mapa con la localización de las estaciones en las provincias de Neuquén y Rio Negro

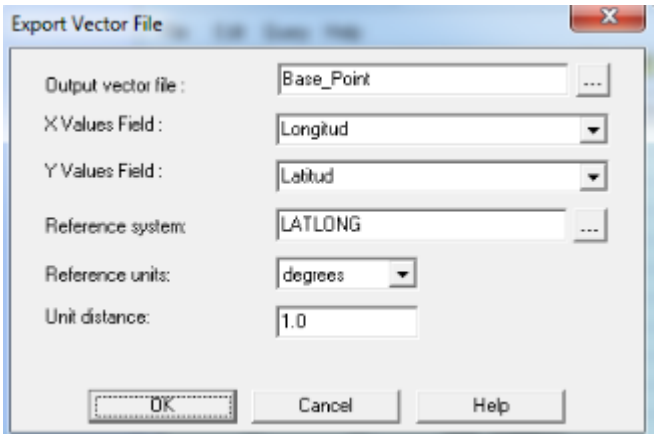


Figura 32: Cuadro de Diálogo Export Vector File.

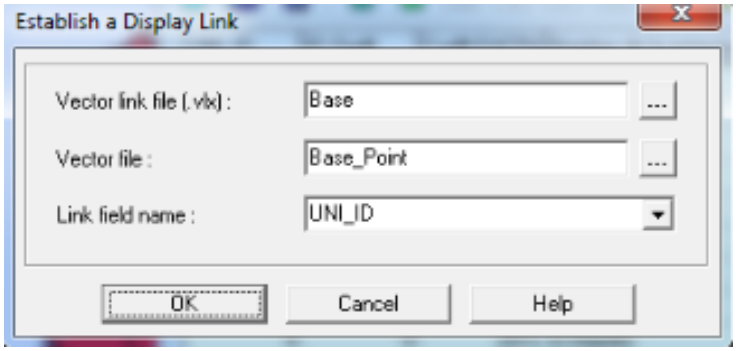


Figura 33: Cuadro de Diálogo de Establish a Display Link

Vector link file: asocia un archivo vectorial de definición de características con una tabla de base de datos.

Vector file: la hoja que se usa como base (archivo vectorial de valores).

Link fieldname: el archivo al cual se hace referencia.

Desde el cuadro DatabaseWorkshop se ejecuta la opción CreateIdrisi Vector File. Aparecerá en pantalla una nueva ventana Export Vector File que se debe completar de la siguiente manera (Figura 34):

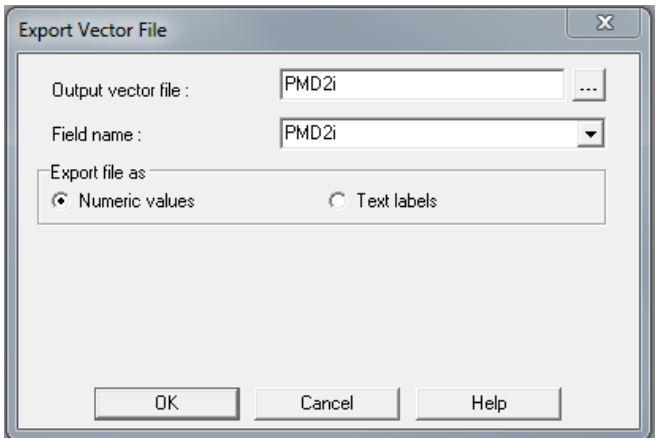


Figura 34: Cuadro de Diálogo Export Vector File

Dicho mecanismo para la generación de vectores se realiza para los valores mínimos, medios y máximos esperados de precipitación para recurrencias de 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años. Los mapas logrados hasta el momento son como el de la Figura 35.

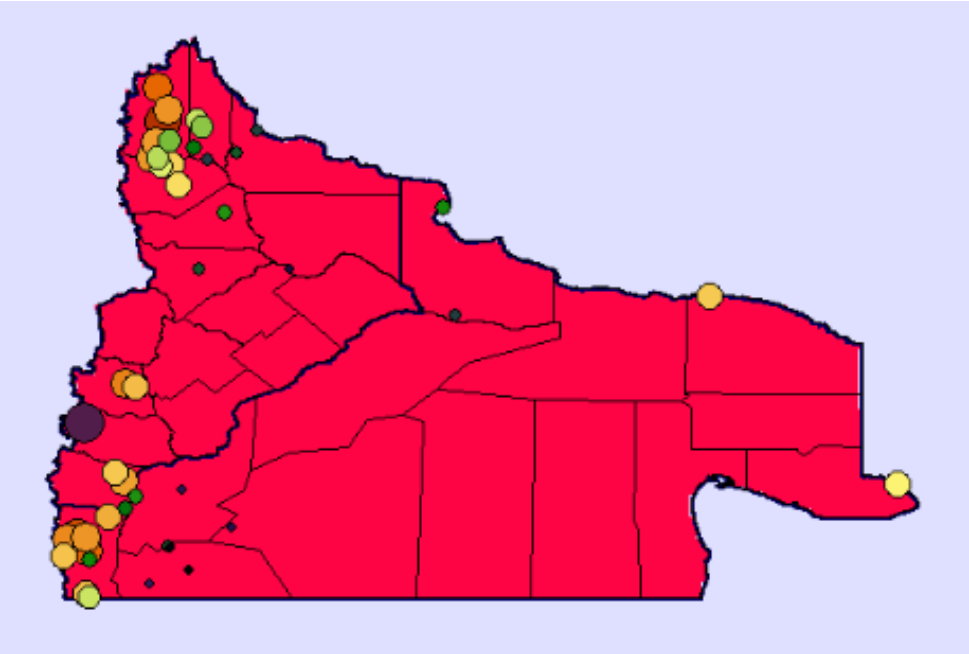


Figura 35: Mapa con la localización y valores de lluvias máximas diarias para T= 2 años, en las provincias de Neuquén y Rio Negro

6.4. GENERACION DE UNA MASCARA PARA DELIMITAR LA ZONA DE INTERPOLACION

Para poder generar las superficies con el método de interpolación de Kriging, el programa necesita la creación de una "mascara", para delimitar las zonas de interpolación de la variable en cuestión. Para ello se describen a continuación los pasos a seguir:

a) En Autocad se generó la superficie que luego se utilizó como mascara, esta debe ser creada con una polilínea cerrada. Una vez terminada se guardó el archivo en formato "dxf" – "Autocad R12".

b) Se importó el archivo dxf a IDRISI, a través de la función "file", "Import", "Desktop publishingformats", "DXFIDRISI" (Figura 36 y Figura 37).

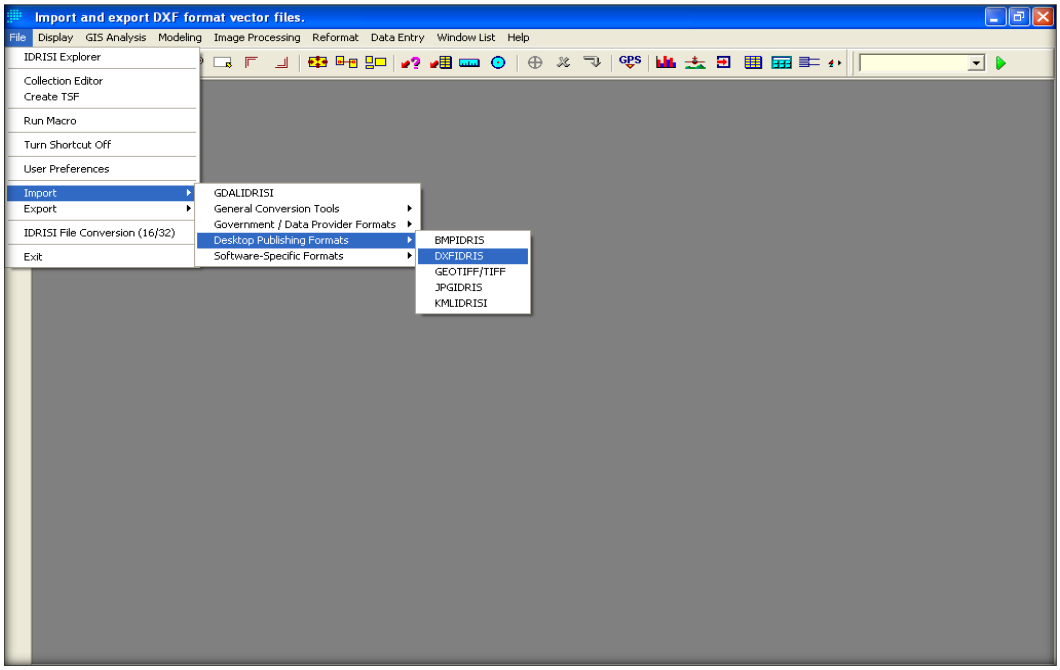


Figura 36: Cuadro de dialogo Import Dxf IDRISI.

.

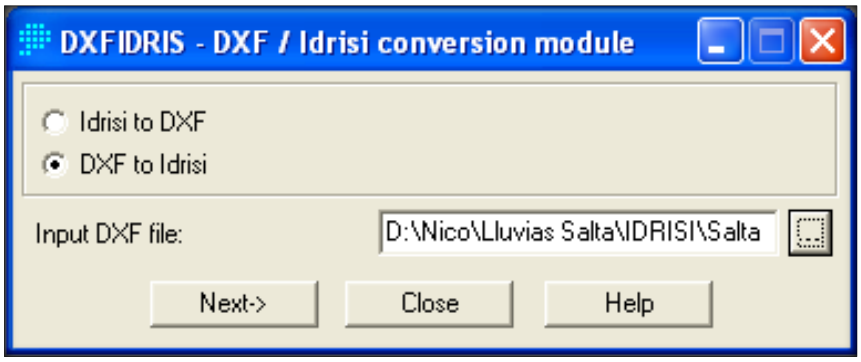


Figura 37: Cuadro de dialogo DXF / Idrisi conversión module

c) Se debe describir la configuración de la superficie, como ser Reference system, Reference units, Features to extract. En la Figura 38, se puede apreciar en detalle la metodología.

d) Luego debo transformar esta superficie que se encuentra como vector en un archivo raster, para poder ser utilizado en el modelo de Kriging, a través de la opción “Reformat” y “RASTERVECTOR” (Figura 39 y Figura 40).

e) Por último, en la Figura 41, se muestra el formato de salida de la máscara utilizada para las provincias de Neuquén y Rio Negro donde se excluye del análisis la región donde no se recopilaron datos pluviométricos.

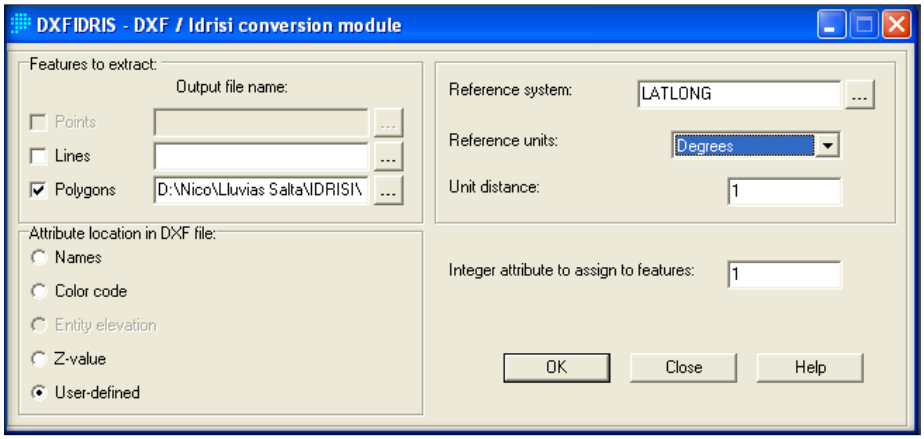


Figura 38: Cuadro de dialogo DXF / Idrisi conversión module

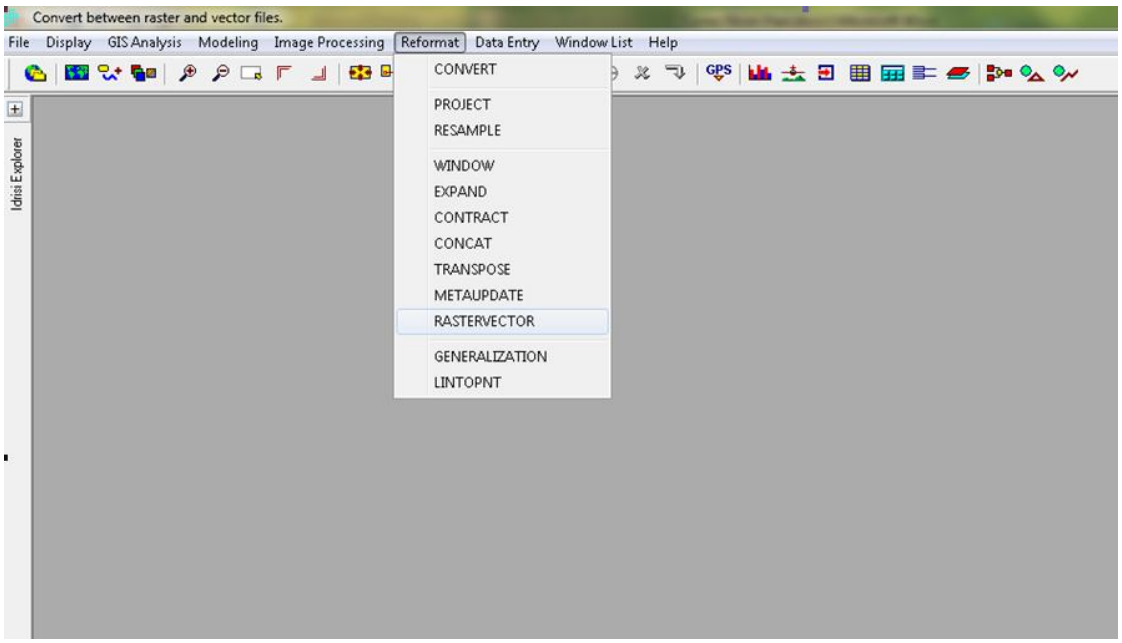


Figura 39: Cuadro de diálogo RASTERVECTOR

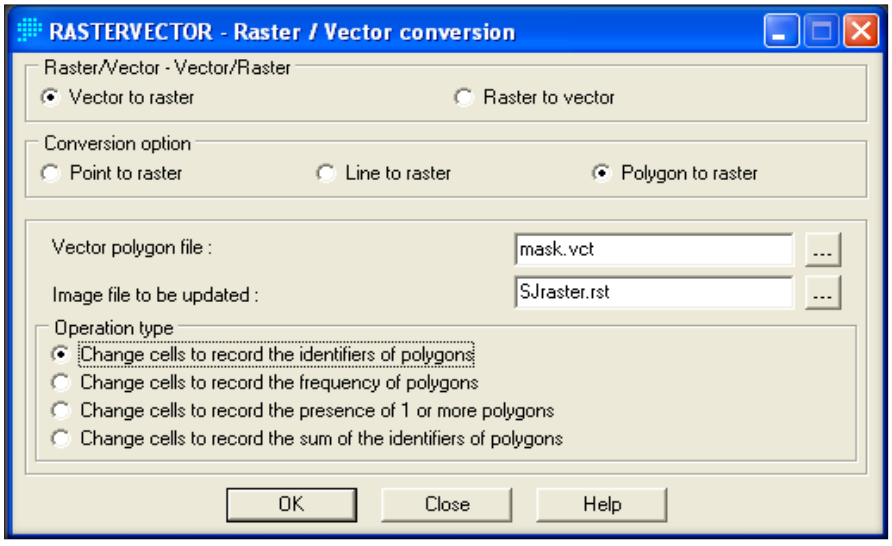


Figura 40: Cuadro de dialogo Raster / Vector Conversión

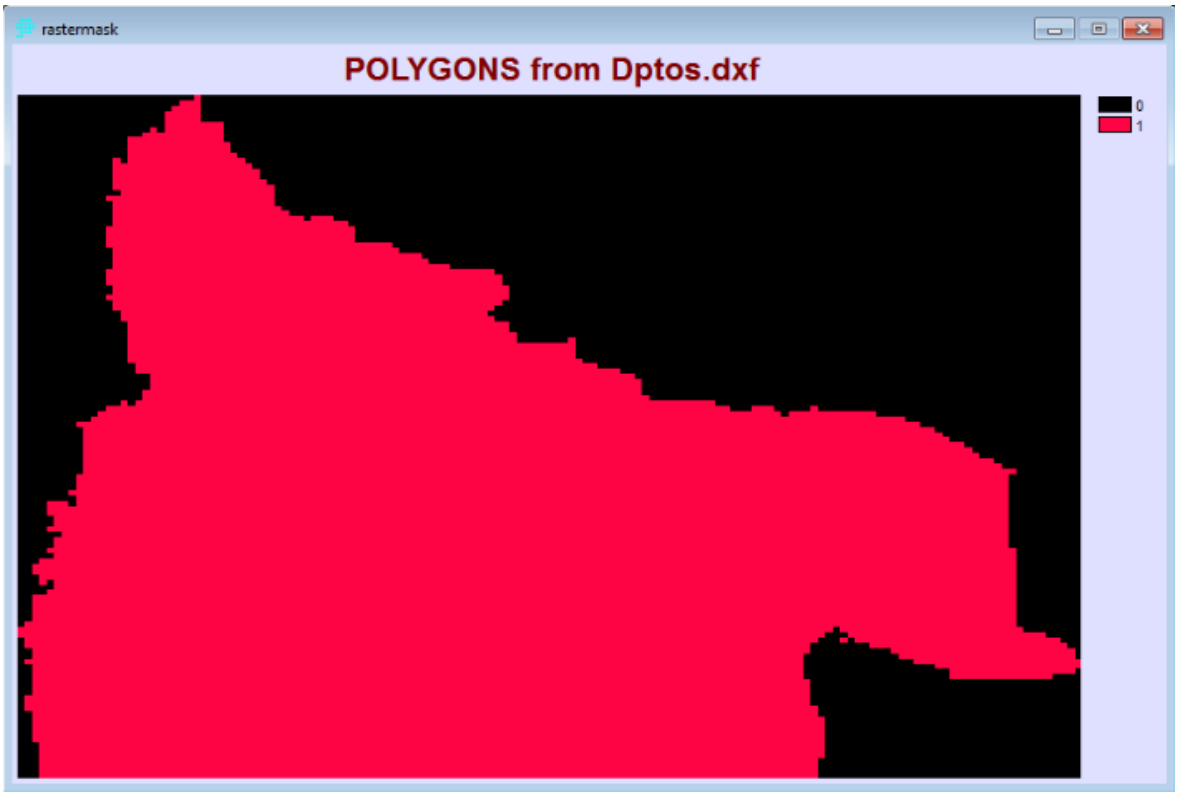


Figura 41: Mascara utilizada para las Provincias de Neuquén y Rio Negro

6.5. METODO DE INTERPOLACION DE KRIGING

El submenú Kriging conduce a tres interfases. En la interface SpacialDependenceModeler (Modelador de Dependencia Espacial), se emplea un amplio rango de herramientas para aprender acerca de los patrones de dependencia espacial en el juego de datos de muestra. En la interfaseModelingFitting (Ajuste de la Modelación), se definen modelos matemáticos para describir las relaciones de covarianza entre los datos de muestra. Por último, en la interfaseKriging and Simulation (Kriging y Simulación) se pueden crear superficies raster completas a partir de datos de muestras y a través de otras interfaces desarrollar modelos. El uso de estas técnicas geo estadísticas es más amplio que el de interpolación, y por lo tanto, también se encuentran disponibles a través del submenú Geo estadística. La geo estadística brinda herramientas para la exploración y caracterización estadística de datos puntuales de muestras. También provee un número de técnicas para la interpolación de superficies a partir de dichos datos. Dentro de estos, el Método de Kriging Ordinario es el más conocido.

Varias técnicas de interpolación fueron introducidas en el apartado Interpolación de Superficies. A diferencia de éstas, las técnicas geo estadísticas permiten incorporar información acerca de los patrones de continuidad espacial en el modelo de interpolación y también producir superficies que incluyen artefactos de variación local. Los métodos permiten un alto grado de flexibilidad en la detección y definición de estructuras que

describen la naturaleza de un grupo de datos. Es más, se puede ensamblar un grupo de estructuras, cada una de las cuales describe un aspecto del grupo de datos.

Con esta flexibilidad, sin embargo, también se genera cierto riesgo. Dentro de un mismo grupo de datos es posible producir muchas superficies, todas muy diferentes y a su vez razonablemente representativas de la realidad. El entendimiento y respeto, por las suposiciones subyacentes de estas técnicas, son esenciales si los resultados deben brindar información significativa para cualquier análisis.

La interfase Kriging y Simulación utiliza el modelo desarrollado en las interfaces Modelador de Dependencia Espacial y Ajuste del Modelo para interpolar una superficie. El modelo se emplea para derivar información sobre la continuidad espacial que define cómo se van a ponderar los datos de muestra cuando se combinen para producir los valores para los puntos desconocidos. Los pesos asociados con puntos muestrales se determinan por la dirección y la distancia con respecto a otros puntos conocidos, así como también por el número y carácter de los puntos de datos en una vecindad local definida por el usuario.

Luego se generan archivos raster a partir de la totalidad de los archivos vectorial anteriormente creados aplicando el método de interpolación Kriging. Los pasos a seguir para la obtención de los mapas de valores mínimos, medios y máximos esperados de precipitación para recurrencias de 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años son:

1. Ejecutar el módulo Kriging, en el menú GIS Analysis elegir el submenú SurfaceAnalysis, seleccionar Interpolation, hacer clic sobre Kriging y finalmente en *Kriging and Simulation* (Figura 42).

2. En el cuadro de diálogo Kriging and Simulation se completarán las opciones (Figura 43).

3. Al usar una máscara se está delimitando el análisis solo a los pixeles que se encuentran dentro de las provincias (Figura 44).

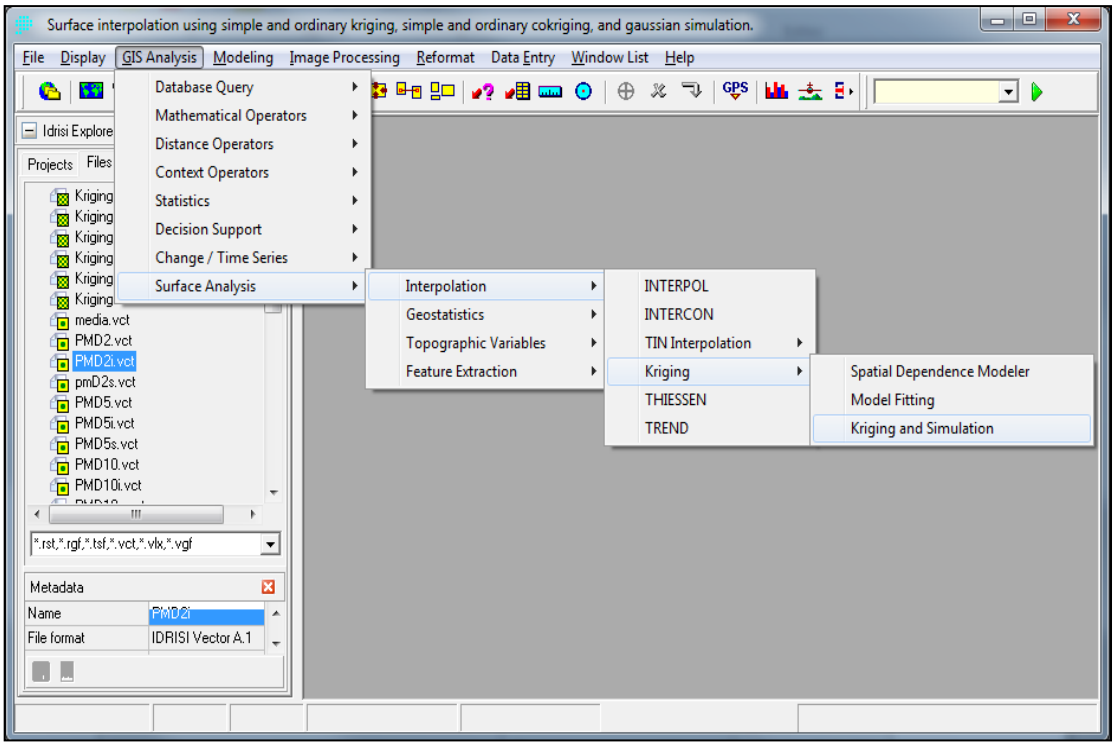


Figura 42: Secuencia para abrir el método de interpolación Kriging and Simulation

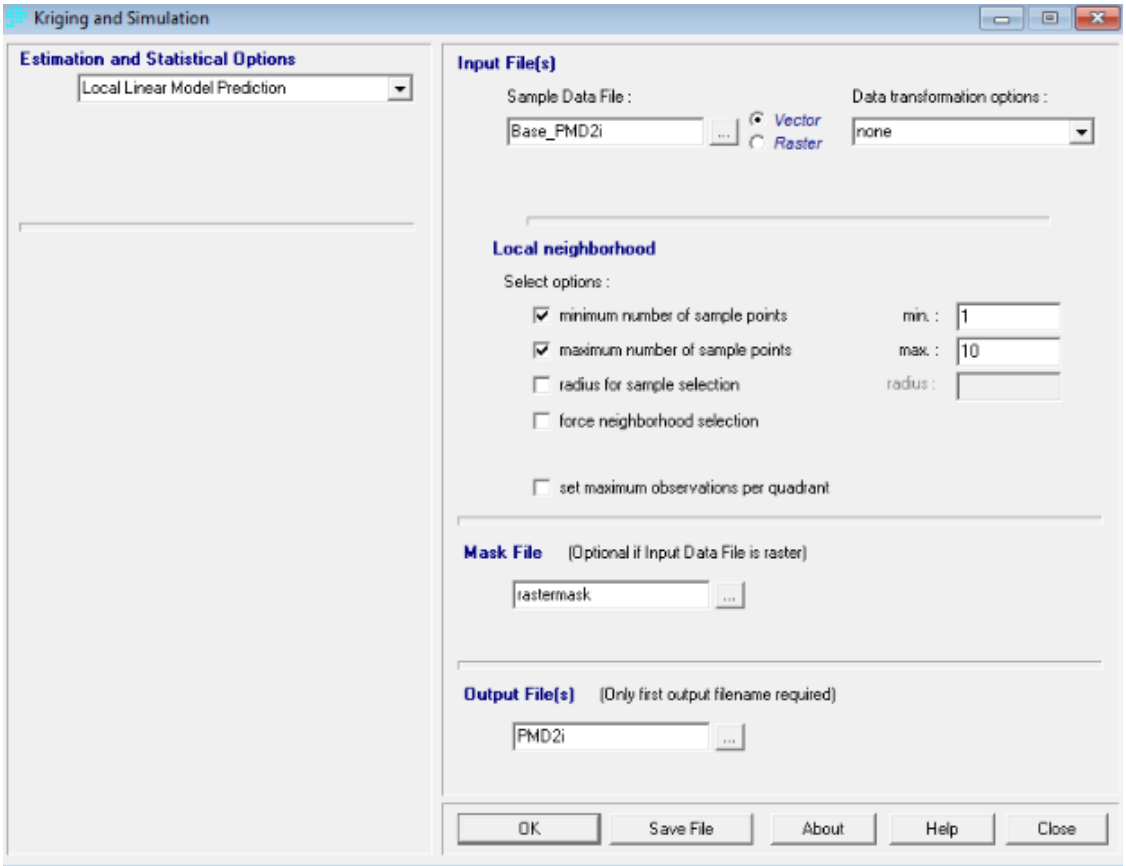


Figura 43: Cuadro de Diálogo Kriging and Simulation

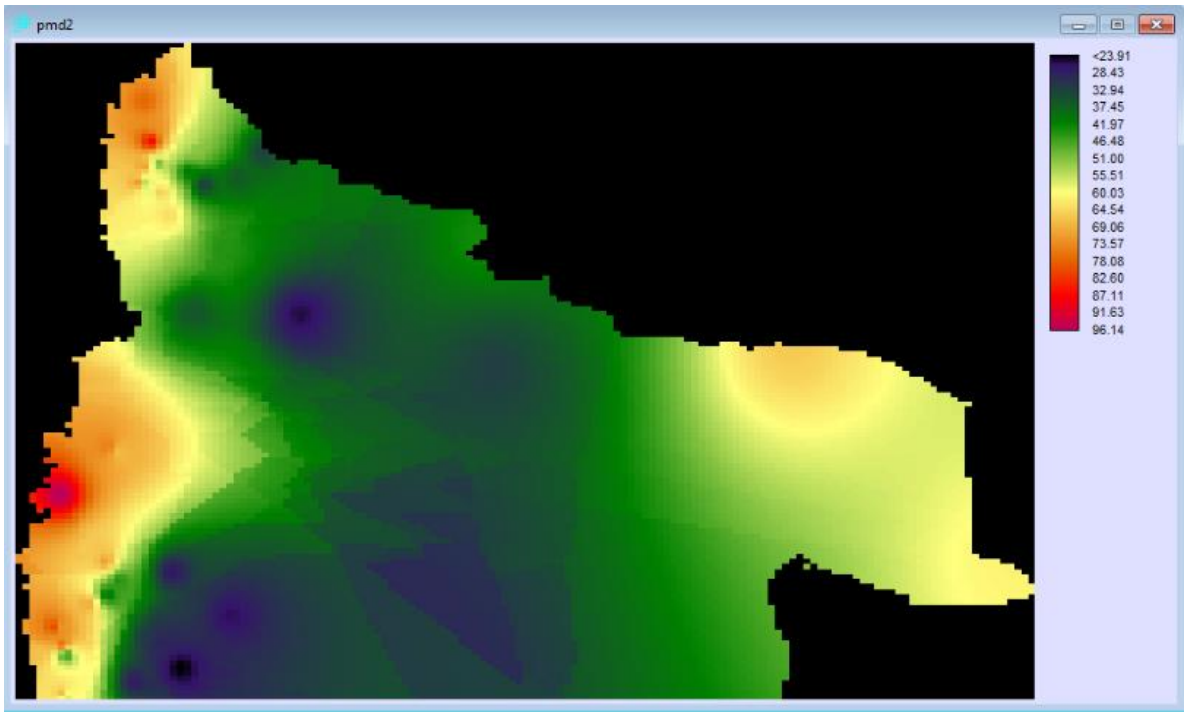


Figura 44: Raster interpolado por el método Kriging para PMD2 (Precipitación media máxima estimada para un período de retorno de dos años)

6.6. METODO DE ANALISIS TENDENCIAL

Las superficies tendenciales son usualmente empleadas para determinar las tendencias espaciales existentes en un grupo de datos. Debido a que la superficie resultante es un modelo matemático ideal, es muy suave y está libre de detalles locales.

El método de análisis tendencial "Trend" es un interpolador global ya que calcula una superficie que ofrece el mejor ajuste, principalmente para todo el grupo de puntos de datos conocidos, pero también es un interpolador inexacto. Los valores de los datos en los puntos conocidos se pueden modificar para coincidir con la superficie más adecuada para todo el grupo de datos. Aplica uno de los tres modelos matemáticamente definidos de superficie ideal (lineal, cuadrática o cúbica) al grupo de datos puntuales de entrada.

Para visualizar cómo funciona "Trend", el manual de IDRISI da un ejemplo, el cual adaptaremos a nuestro caso. Se supone datos de precipitación en varias estaciones, el modelo de superficie lineal es chato (plano). Imaginar los datos de precipitación como puntos que flotan por encima de la parte superior de una mesa. La altura de cada punto sobre la mesa depende de su precipitación. Ahora suponer un trozo de papel plano ubicado sobre la mesa.

Sin doblar el papel en absoluto, se ajusta la inclinación y la altura del mismo de manera tal que la suma de las distancias entre éste y cada punto sea minimizada. Algunos puntos se encuentran por encima del plano del papel y algunos por debajo. Es más, es posible que ningún punto se encuentre en el papel mismo. Sin embargo, la separación general entre

el modelo (el plano) y los puntos muestrales es minimizada. A cada píxel en el área de estudio se le puede asignar entonces la precipitación que corresponde con la altura del papel en esa ubicación de píxel.

El mismo ejemplo se puede utilizar para visualizar los modelos de superficie tendencial cuadrática y cúbica. No obstante, en estos casos, está permitido doblar el papel (pero no arrugarlo). La superficie cuadrática permite la presencia de pliegues amplios en el papel, mientras que la cúbica permite pliegues más complejos aún. "Trend" funciona en gran parte como esta analogía exceptuando que una fórmula polinomial que describe el modelo de superficie ideal reemplaza el papel. Esta fórmula se utiliza con el fin de derivar valores para todos los pixeles en la imagen.

6.6.1. Creación de Superficies Tendenciales.

En base a las interpolaciones obtenidas por el método de Kriging de los valores medios de precipitación diaria para distintas recurrencias, se aplicará la función "Trend" para producir una imagen de superficie tendencial. Los pasos a seguir son los siguientes:

1. En el menú GIS Analysis, seleccionar el submenú SurfaceAnalysis, Interpolation y finalmente hacer clic en "Trend" (Figura 45): Secuencia para abrir el método de interpolación de Trend.

2. Se abrirá el cuadro de diálogo de la Figura 46. En Input image, se debe ingresar cada uno de los archivos raster, de valores medios para distintas recurrencias, obtenidos por el método Kriging. En "Order of Surface to be fitted" se especifica los valores 1, 2 y 3, que corresponden a las regresiones lineal, cuadrática y cúbica respectivamente.

Además de la superficie interpolada producida (Figura 47), "Trend" informa (en forma de porcentaje) hasta qué punto el modelo elegido asigna los puntos de entrada. También comunica el cociente-F y los grados de libertad, los cuales pueden ser usados para verificar si la tendencia modelada es significativamente diferente a cero (es decir, ninguna tendencia en absoluto).

3. Función "Overlay". Mediante esta aplicación se busca llevar la imagen tendencial al límite de la región en interés, en nuestro caso la periferia formada por la provincia de Chaco y Formosa. Esta función puede aparecer tanto en el menú GIS "Analysis - DatabaseQuery" como en el menú GIS "Analysis – Mathematical Operators". La primera de las formas se muestra en la Figura 48. Y luego los pasos a seguir se muestran en la Figura 49.

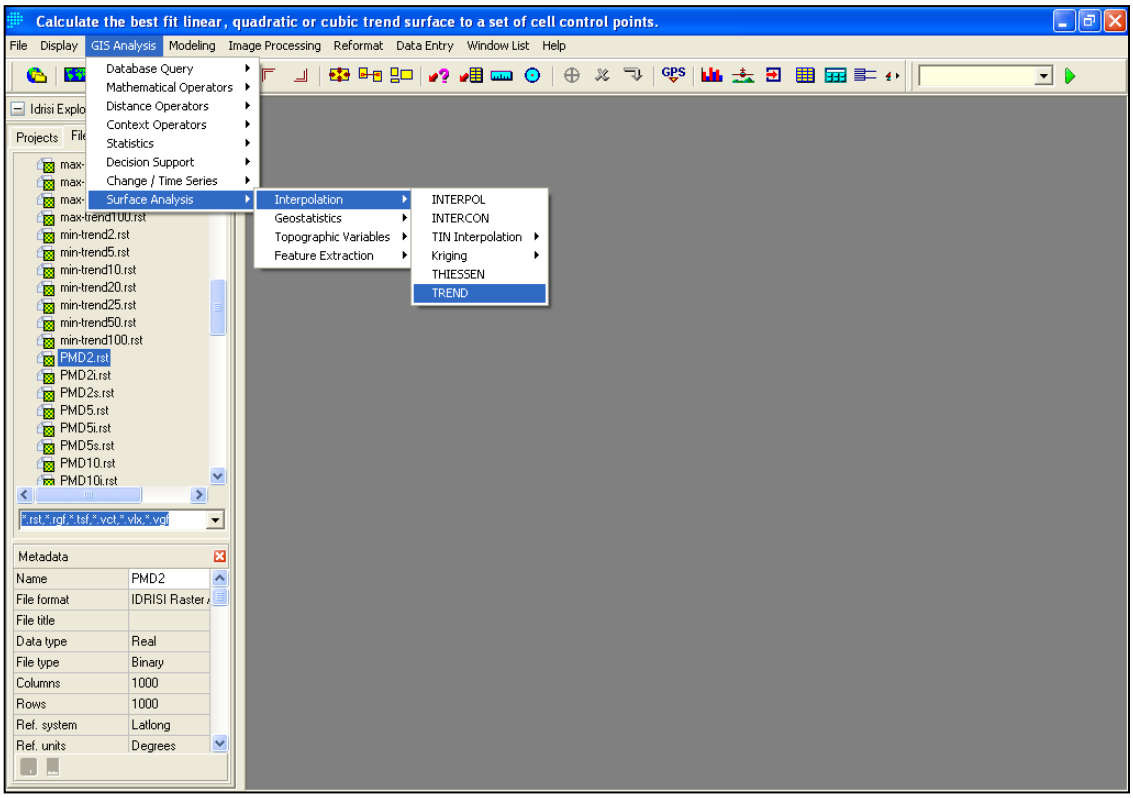


Figura 45: Secuencia para abrir el método de interpolación Trend

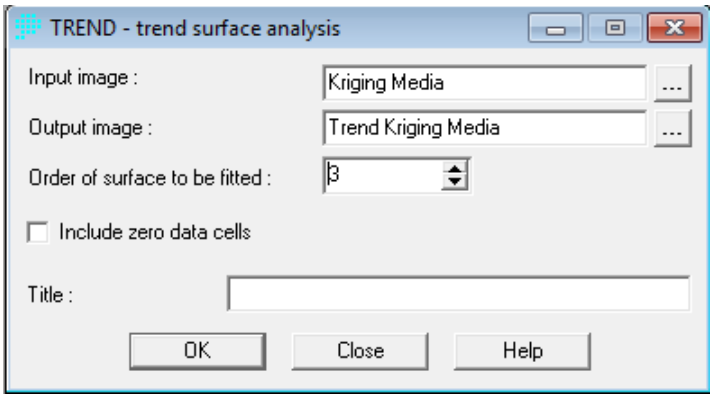


Figura 46: Cuadro de diálogo del método de interpolación Trend

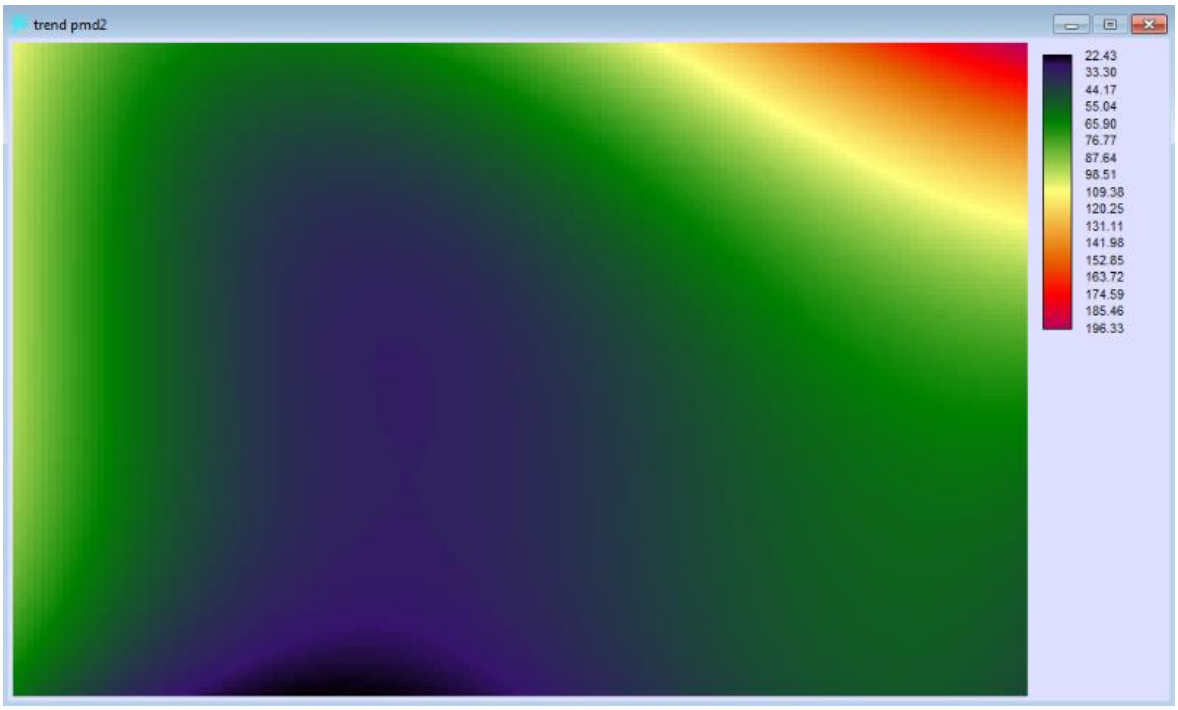


Figura 47: Superficie tendencial. Regresión Lineal. T = 2 Años

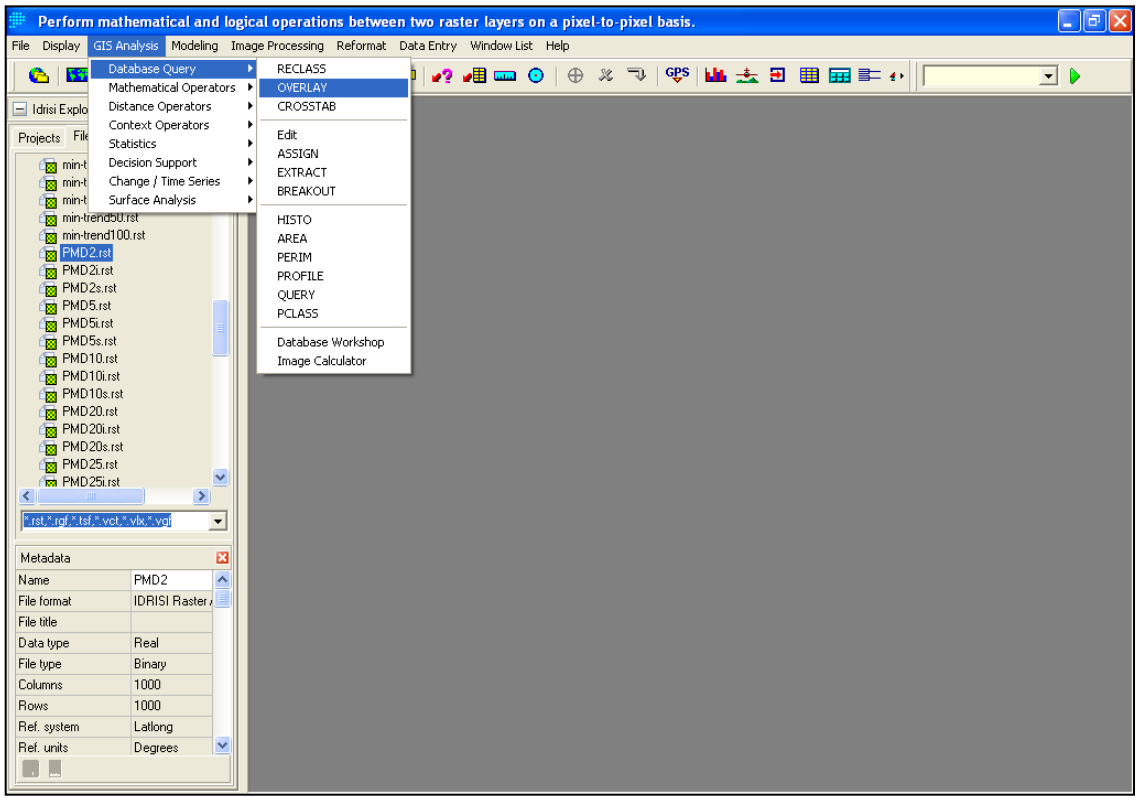


Figura 48: Secuencia para abrir la función "Overlay".

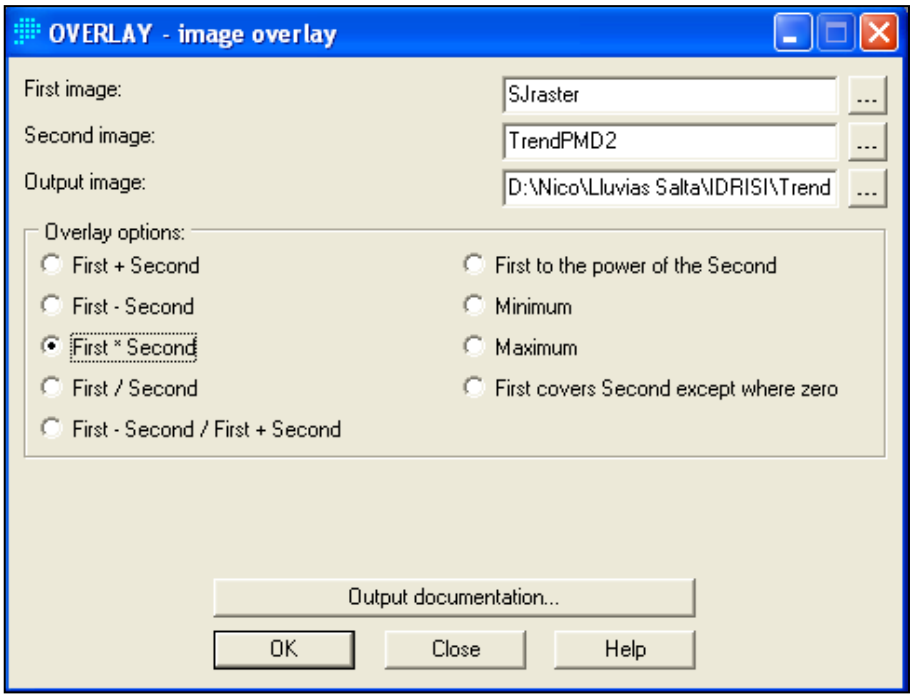


Figura 49: Cuadro de diálogo de la función Overlay

La operación de la Figura 49, se representa mediante el esquema siguiente (Figura 50):

Figura 50: Esquema de la operación OVERLAY (multiplicación)

En la Figura 51 se muestra un ejemplo de las superficies tendenciales para un periodo de retorno de 2 años.

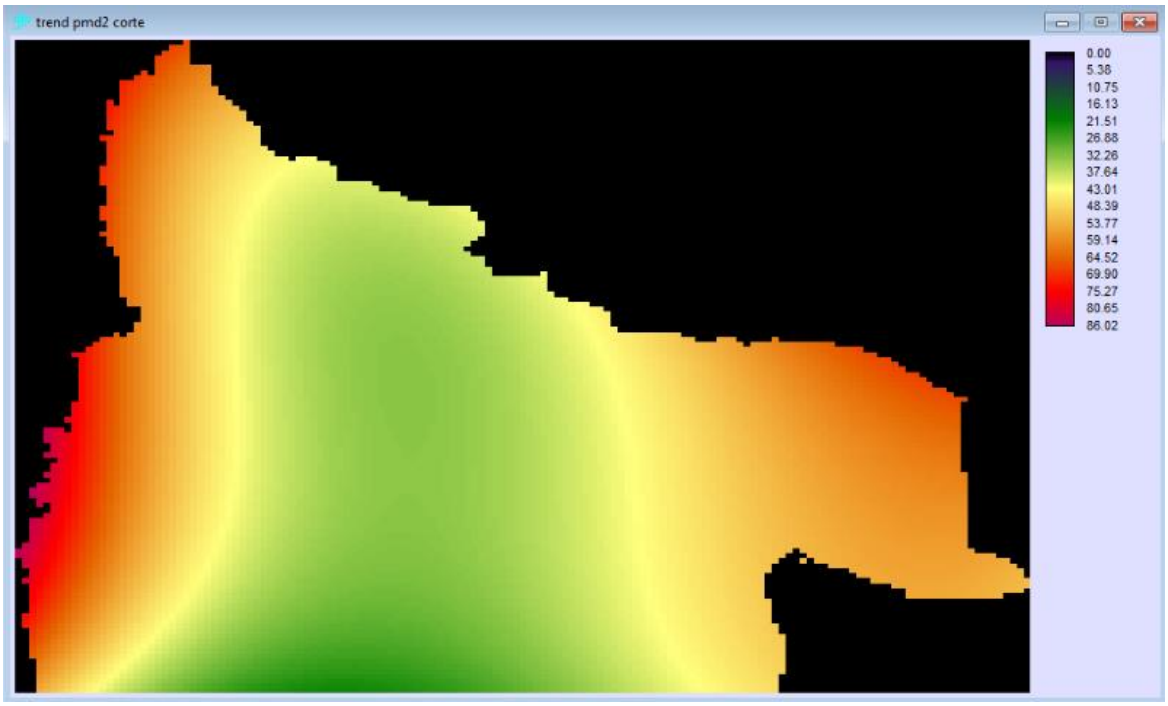


Figura 51: Grilla interpolado por el método Trend. T = 2 Años Media de las series históricas de las lluvias máximas diarias anuales

6.6.2. Histograma de frecuencias.

Una vez obtenidas las interpolaciones por el método de Kriging para los valores superiores e inferiores de los intervalos de confianza de la lámina de lluvias máximas diarias anuales para distintas recurrencias y las tendencias de los valores medios, se debe verificar que los valores se encuentren comprendidos dentro del intervalo de confianza y si existen valores localizados fuera de él, el porcentaje sea muy pequeño en el fin de validar el uso del mapa tendencial.

- Valores dentro del intervalo de confianza:

Kriging mínimo - Trend medio < 0 ⇒ Valores mínimos < Valores medios

Kriging máximo - Trend medio > 0 ⇒ Valores máximos > Valores medios

Para visualizar esto, se representa en un esquema en la Figura 52, la curva que simboliza al *Trend Medio* queda entre las curvas que simbolizan el *kriging máximo* y *kriging mínimo.*

- Valores fuera del intervalo de confianza:

Kriging mínimo - Trend medio > 0 ⇒ Valores mínimos > Valores medios

Kriging máximo - Trend medio < 0 ⇒ Valores máximos < Valores medios

Se muestra también mediante esquemas estas dos opciones, la primera ecuación se representa en la Figura 53 y la segunda ecuación en la Figura 54:

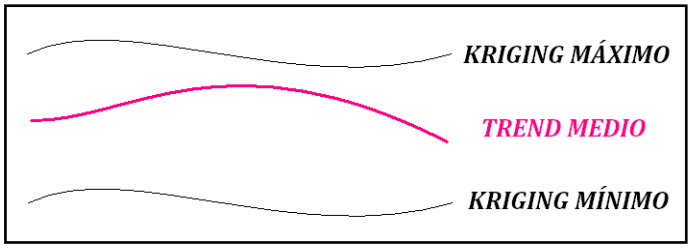


Figura 52: Esquema donde los valores de lluvias diarias máximas medias quedan dentro del intervalo de confianza.

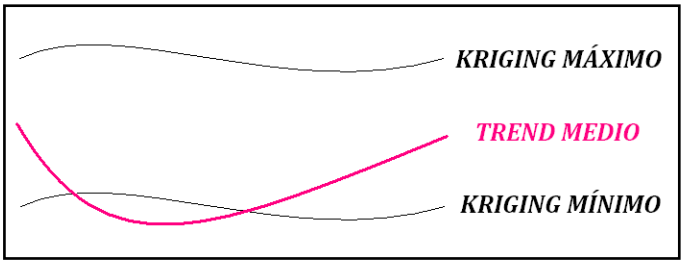


Figura 53: Esquema donde los valores de lluvias diarias máximas medias quedan fuera del intervalo de confianza. (Se presenta subestimación)

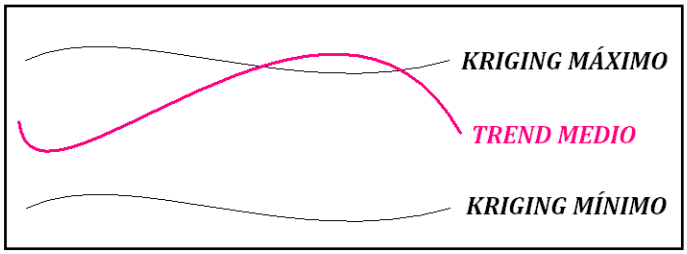


Figura 54: Esquema donde los valores de lluvias diarias máximas medias quedan fuera del intervalo de confianza. (Se presenta sobrestimación)

La diferencia entre las interpolaciones por el método de Kriging para los valores superiores e inferiores de los intervalos de confianza y las tendencias de los valores medios para regresiones lineal, cuadrática y cúbica, se lleva a cabo mediante la función Overlay, en el menú "GIS Analysis" seleccionando "Mathematical Operators" (Figura 55). Se presenta a modo de ejemplo un archivo raster obtenido (Figura 56).

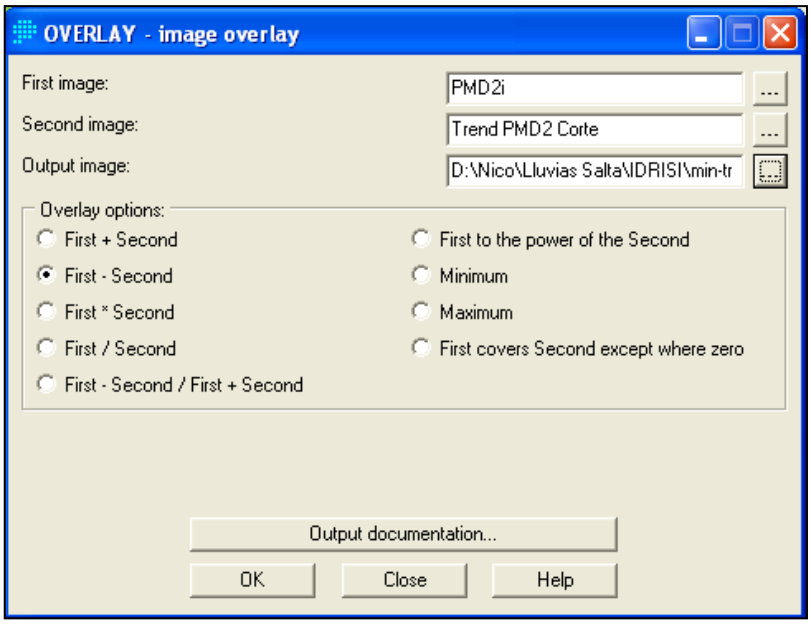


Figura 55: Cuadro de dialogo de la función Overlay

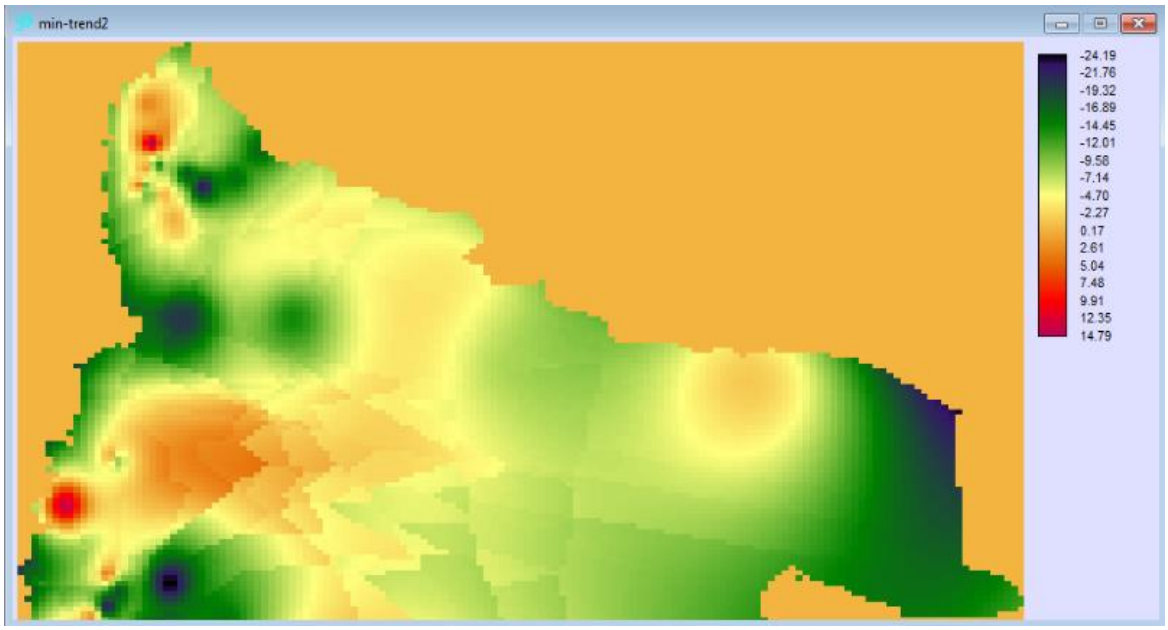


Figura 56: Diferencia entre "Kriging" (valores mínimos) y "Trend" (regresión lineal) [mm]. T = 2 Años

Para poder visualizar la cantidad de valores que se encuentran fuera del intervalo de confianza se recurre a los histogramas de frecuencia. El módulo "Histo" ofrece un histograma de frecuencia de los valores de las celdas dentro de una imagen. Además, calcula la desviación promedio y estándar para toda la imagen y para el rango de datos especificado.

Esta herramienta acepta dos formas de producción: gráfica y numérica. Para el histograma gráfico hay varias opciones, incluyendo gráficos de líneas, barras y áreas, y opciones acumulativas y no acumulativas. La visualización numérica ofrece un resumen de

las frecuencias de cada clase junto con frecuencias acumulativas y proporcionales. A partir de esto, puede determinarse con facilidad la mediana así como también cualquier otro rango porcentual. Para ejecutar la función, desde el menú "GIS Analysis" seleccionar el submenú "Statistics" y elegir la opción "Histo" (Ver Figura 57).

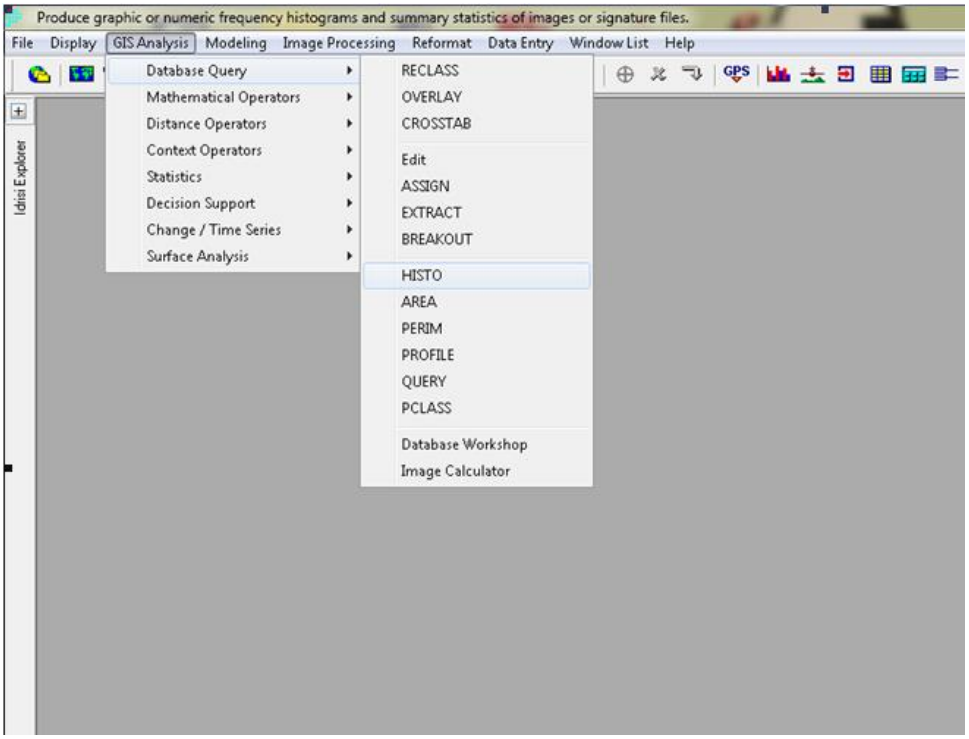


Figura 57: Secuencia para abrir la función Histo

El cuadro de diálogo se completa como se muestra (Figura 58). Se realizará un histograma para cada diferencia realizada entre las interpolaciones por el método de Kriging para los valores máximos y mínimos y las tendencias de los valores medios para regresiones lineal, cuadrática y cúbica. El ancho de clase y los valores mínimo y máximo quedan definidos automáticamente al abrir el archivo raster.

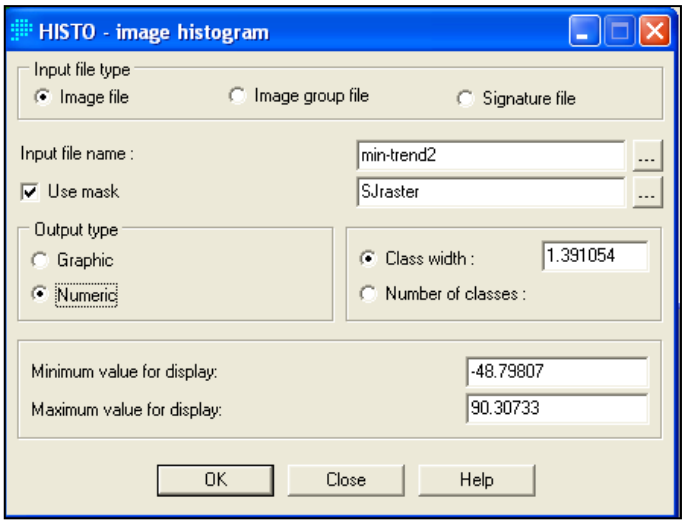
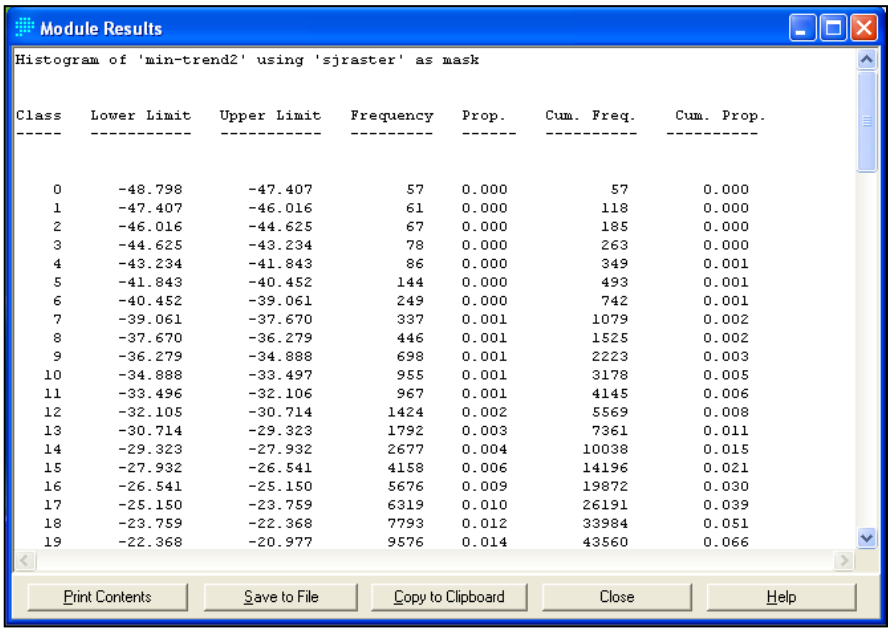


Figura 58: Cuadro de diálogo de la función Histo.

Para cuantificar los valores fuera del intervalo de confianza, es fundamental obtener un histograma numérico, para ello es necesario utilizar una máscara, en nuestro caso 25 [km^2], de esta manera solo se obtendrán valores de histograma para la zona de interés obviando lo restante que lleva a un error en los resultados. El archivo de salida (Figura 59) presenta siete columnas, ellas son: Clase, Límite Inferior, Límite Superior, Frecuencia, Proporción, Frecuencia Acumulada y Proporción Acumulada.



Class	Lower Limit	Upper Limit	Frequency	Prop.	Cum. Freq.	Cum. Prop.
0	-48.798	-47.407	57	0.000	57	0.000
1	-47.407	-46.016	61	0.000	118	0.000
2	-46.016	-44.625	67	0.000	185	0.000
3	-44.625	-43.234	78	0.000	263	0.000
4	-43.234	-41.843	86	0.000	349	0.001
5	-41.843	-40.452	144	0.000	493	0.001
6	-40.452	-39.061	249	0.000	742	0.001
7	-39.061	-37.670	337	0.001	1079	0.002
8	-37.670	-36.279	446	0.001	1525	0.002
9	-36.279	-34.888	698	0.001	2223	0.003
10	-34.888	-33.497	955	0.001	3178	0.005
11	-33.496	-32.106	967	0.001	4145	0.006
12	-32.105	-30.714	1424	0.002	5569	0.008
13	-30.714	-29.323	1792	0.003	7361	0.011
14	-29.323	-27.932	2677	0.004	10038	0.015
15	-27.932	-26.541	4158	0.006	14196	0.021
16	-26.541	-25.150	5676	0.009	19872	0.030
17	-25.150	-23.759	6319	0.010	26191	0.039
18	-23.759	-22.368	7793	0.012	33984	0.051
19	-22.368	-20.977	9576	0.014	43560	0.066

Figura 59: Histograma numérico de frecuencias. Producción numérica

El histograma de frecuencias gráfico obtenido es (Figura 60):

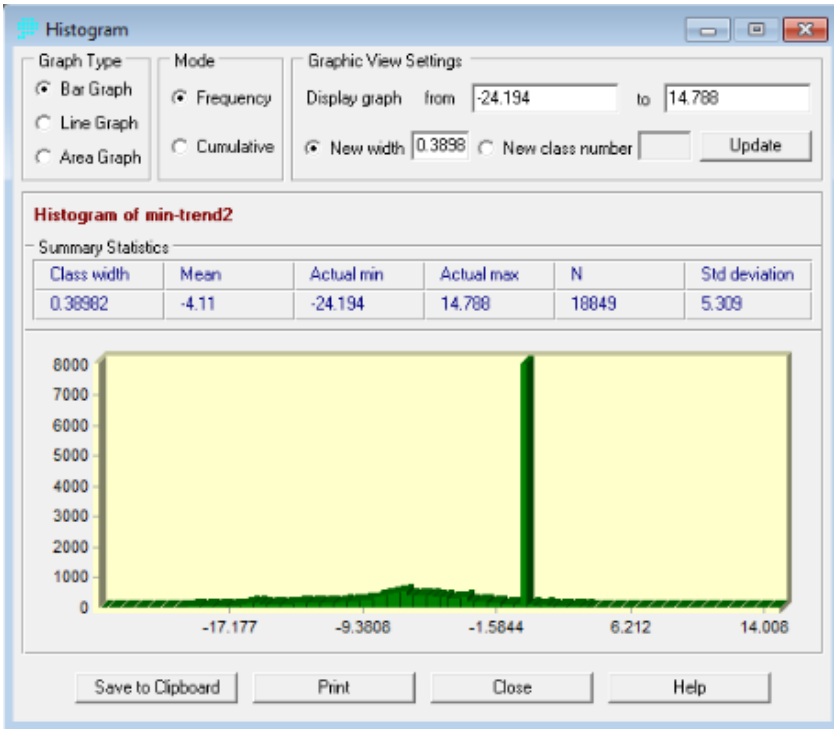


Figura 60: Histograma de frecuencias min-trend para un periodo de retorno de 2 años. Producción gráfica.

Se observa que la mayoría de los valores son negativos, lo que responde a que la mayoría están dentro del intervalo min-trend.

También observamos el histograma de frecuencias max-trend para un período de retorno de dos años, quedando la mayoría de los valores mayores a cero, indicando que están dentro del intervalo max-trend. (Figura 61).

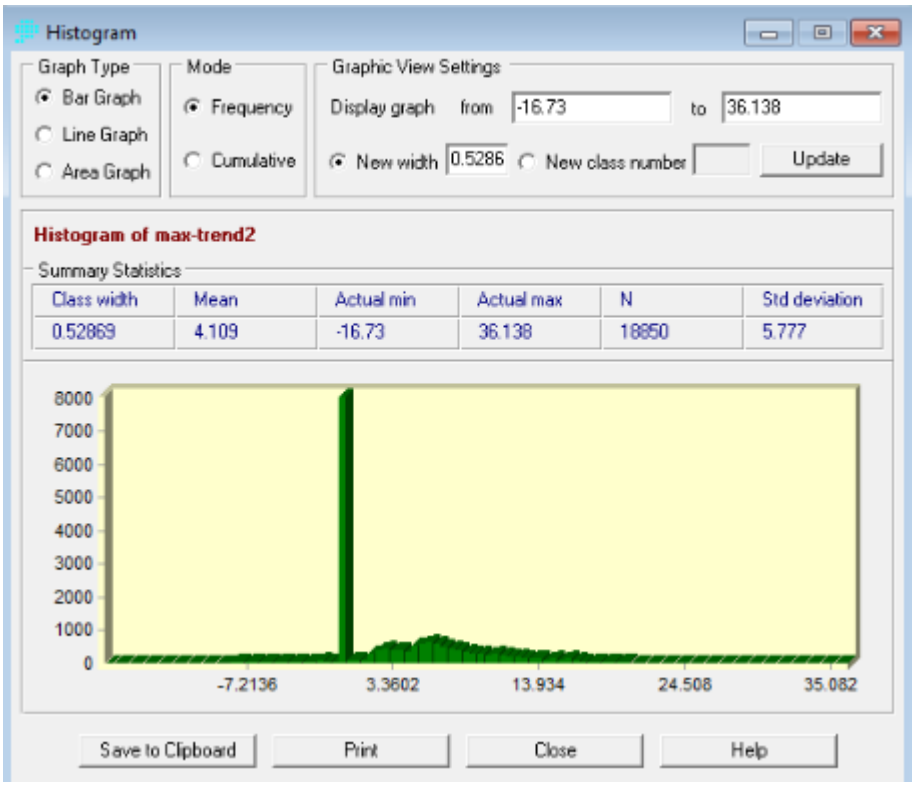


Figura 61: Histograma de frecuencias max-trend para un periodo de retorno de 2 años. Producción gráfica.

En las dos figuras anteriores (60 y 61) se ve con claridad que en 0 aparece la mayor de las columnas, la gran cantidad de valores nulos corresponde a que cuando se realiza la operación de resta entre las dos imágenes (Mínima–Tendencia y Máximo-Tendencia), no solo intervienen las provincias sino también todo el contorno alrededor, es decir, los valores correspondientes a la zona fuera de la máscara de la provincia de Neuquén y Rio Negro.

De la Tabla 22 a la 28 se muestran los porcentajes de valores fuera del intervalo de confianza para las distintas recurrencias y tipos de regresión de la función “Trend”.

	Cúbica
Máximo - Medio	4,90%
Mínimo - Medio	3,50%

Tabla 22: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 2 Años.

	Cúbica
Máximo - Medio	3,10%
Mínimo - Medio	1,40%

Tabla 23: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 5 Años.

	Cúbica
Máximo - Medio	1,90%
Mínimo - Medio	0,40%

Tabla 24: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 10 Años.

	Cúbica
Máximo - Medio	1,30%
Mínimo - Medio	0,10%

Tabla 25: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 20 Años.

	Cúbica
Máximo - Medio	1,20%
Mínimo - Medio	0,10%

Tabla 26: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 25 Años.

	Cúbica
Máximo - Medio	3,80%
Mínimo - Medio	0,00%

Tabla 27: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 50 Años.

	Cúbica
Máximo - Medio	3,60%
Mínimo - Medio	0,00%

Tabla 28: Porcentaje de valores fuera del intervalo para T = 100 Años.

A medida que el periodo de retorno aumenta es menor el porcentaje de puntos de la superficie tendencial que quedan fuera del intervalo de confianza; y esto se debe que a mayor tiempo de retorno los intervalos de confianza son mayores. Para el caso más desfavorable (es decir T=2 años), menos del 9% de los pixeles quedan afuera del intervalo de confianza, por lo tanto se puede decir que la tendencia adoptada es buena (Figura 62).

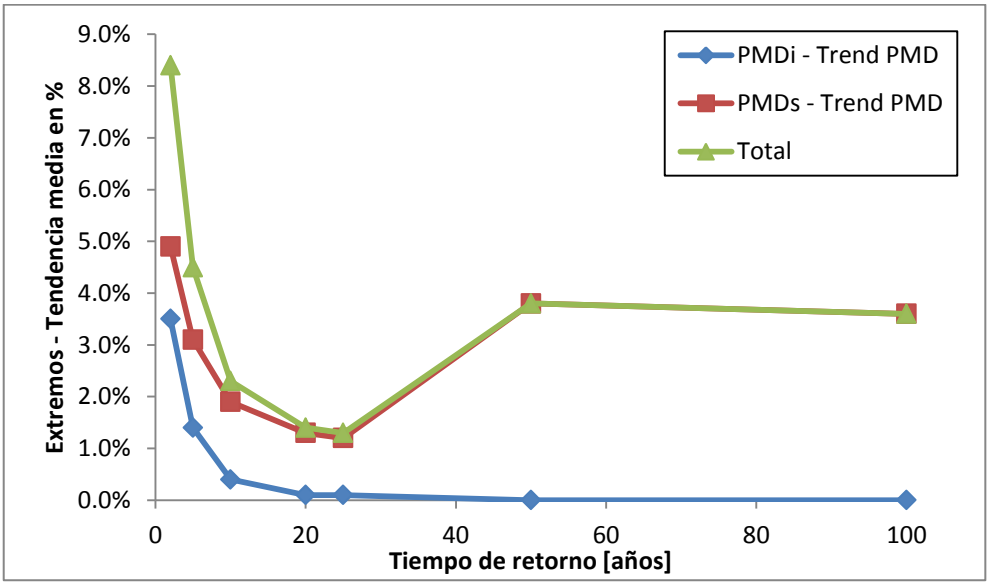


Figura 62: Diferencia porcentual ente valores medios y extremos.

6.7. MAPAS TENDENCIALES DE LLUVIAS DIARIAS MAXIMAS ANUALES PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO.

Por último, como resultado de las operaciones realizadas en las secciones anteriores, se llega al producto final. Se muestran los mapas de lluvia diaria máxima anual asociados a los diferentes períodos de retorno analizados para las provincias de Neuquén y Rio Negro. (Figuras 63 a 69).

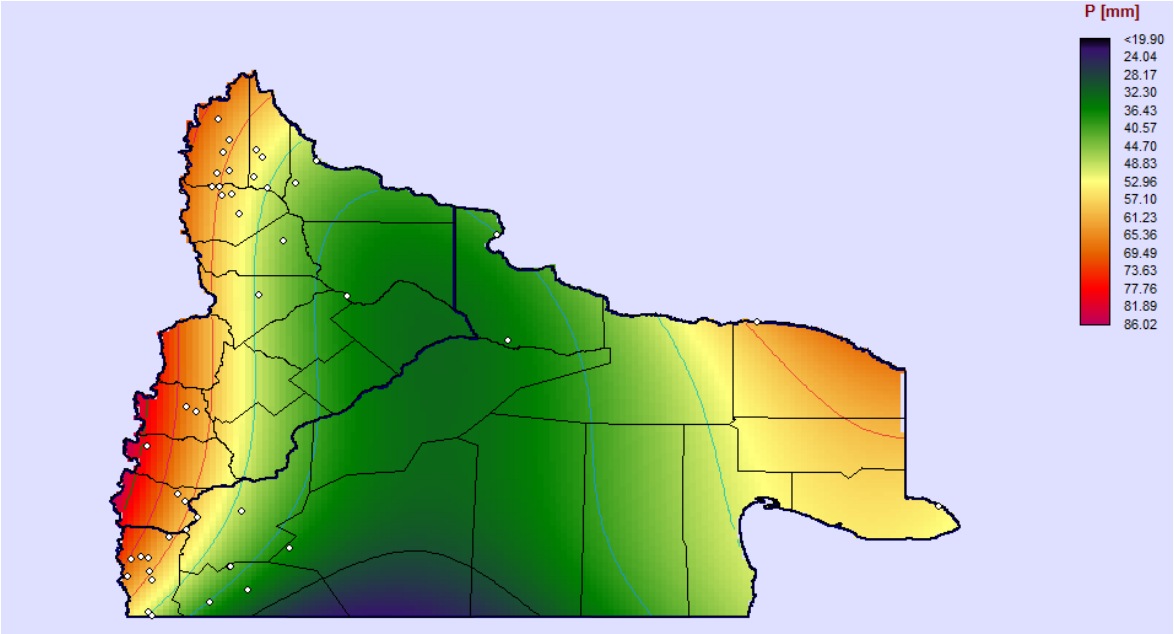


Figura 63: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Neuquén y Rio Negro para un Periodo de retorno T= 2 años [mm].

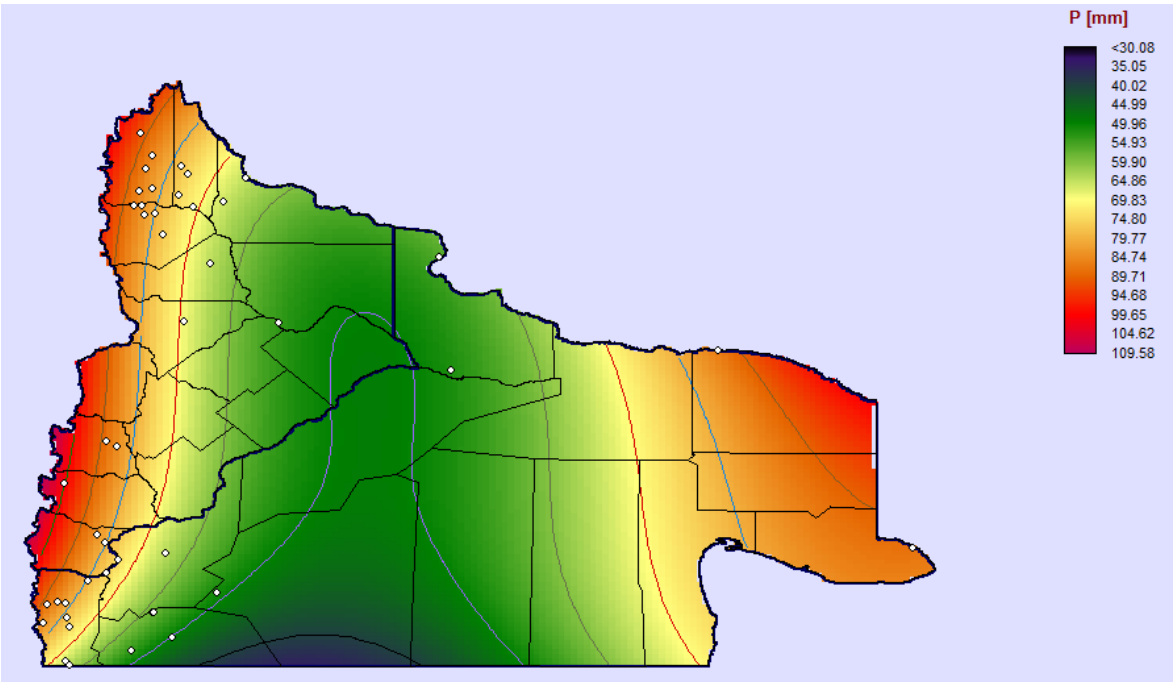


Figura 64: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Neuquén y Rio Negro para un Periodo de retorno T= 5 años [mm]

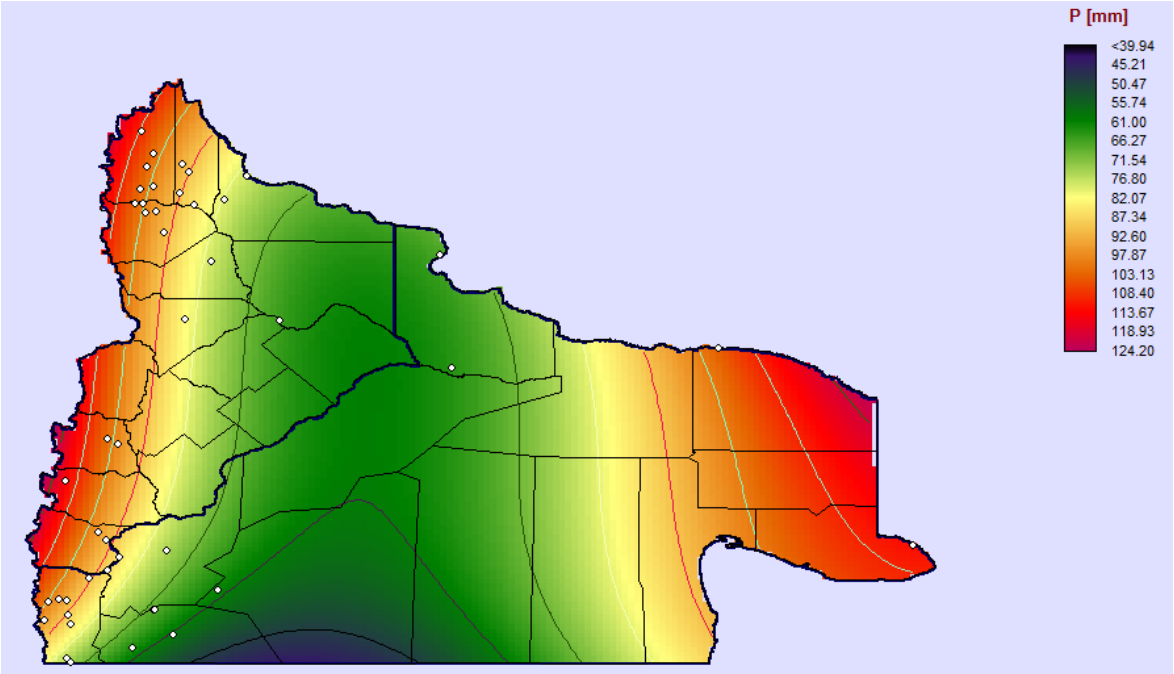


Figura 65: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Neuquén y Rio Negro para un Periodo de retorno T= 10 años [mm].

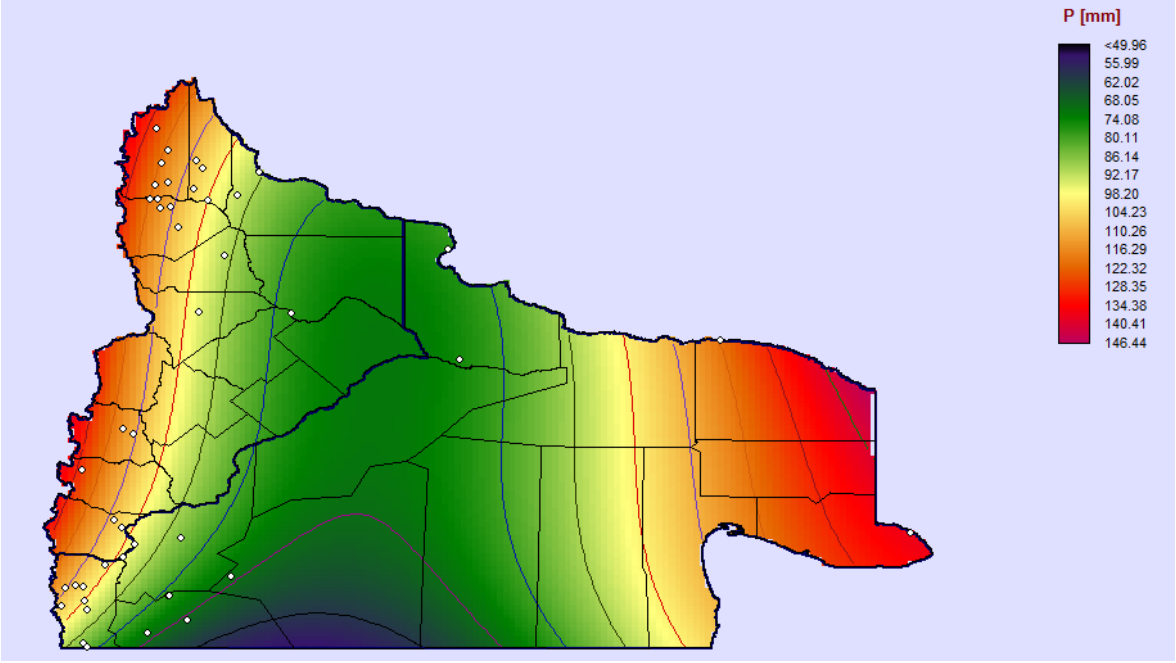


Figura 66: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Neuquén y Rio Negro para un Periodo de retorno T= 20 años [mm].

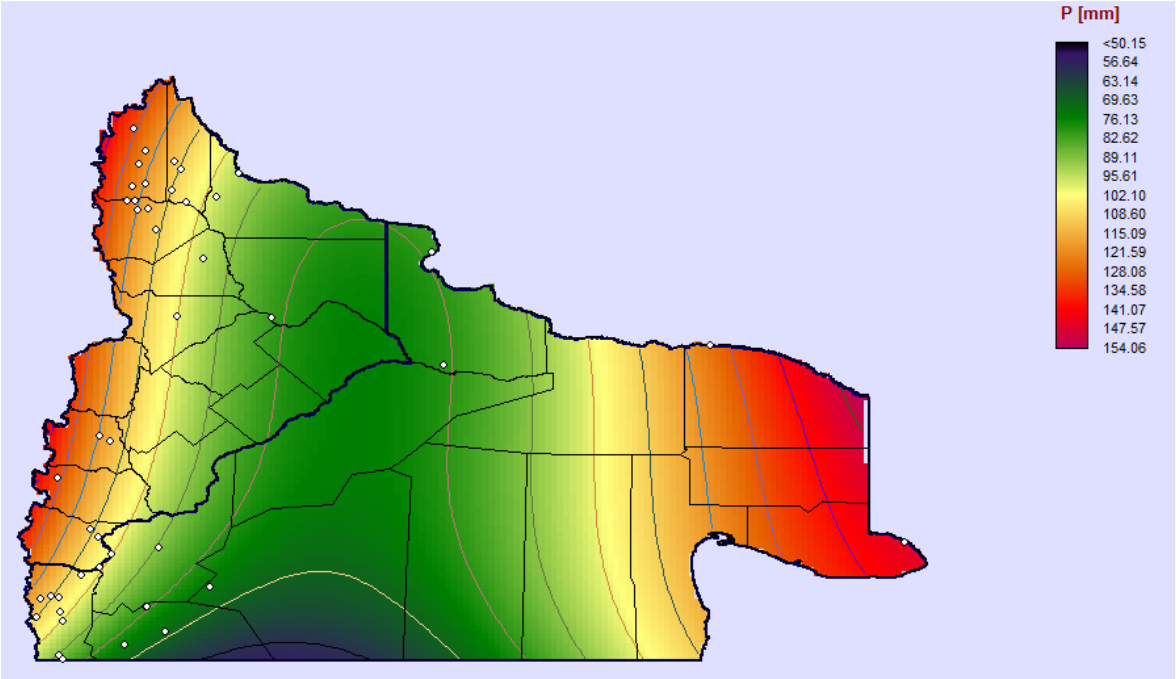


Figura 67: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Neuquén y Rio Negro para un Periodo de retorno T= 25 años [mm].

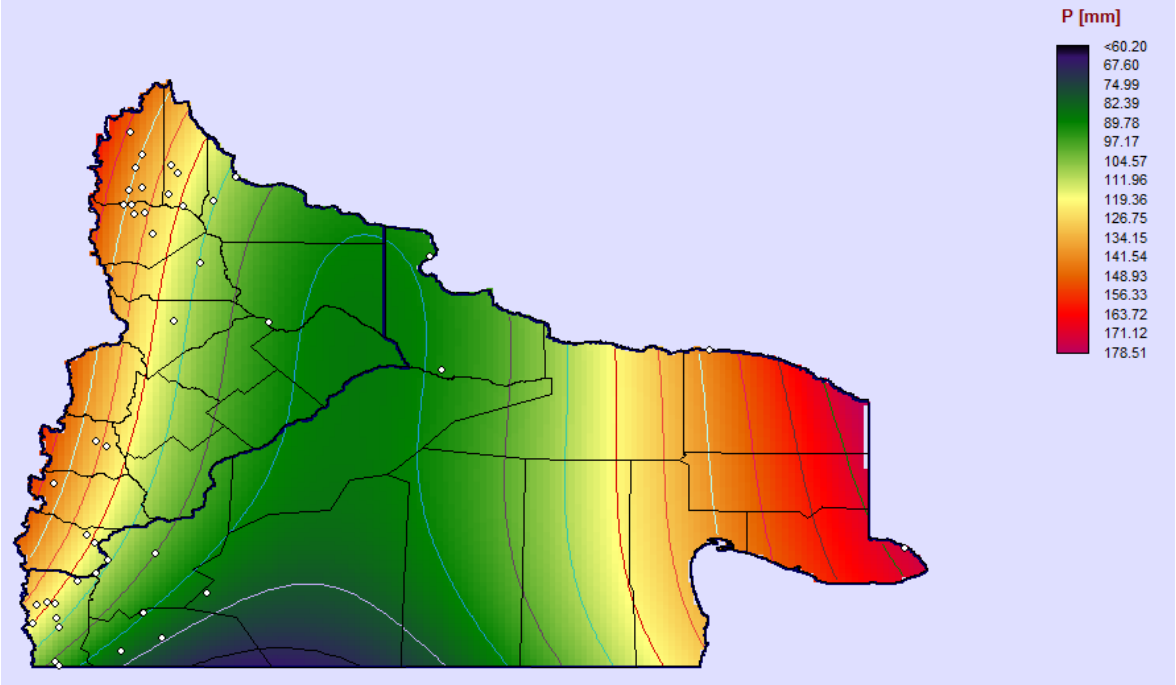


Figura 68: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Neuquén y Rio Negro para un Periodo de retorno T= 50 años [mm].

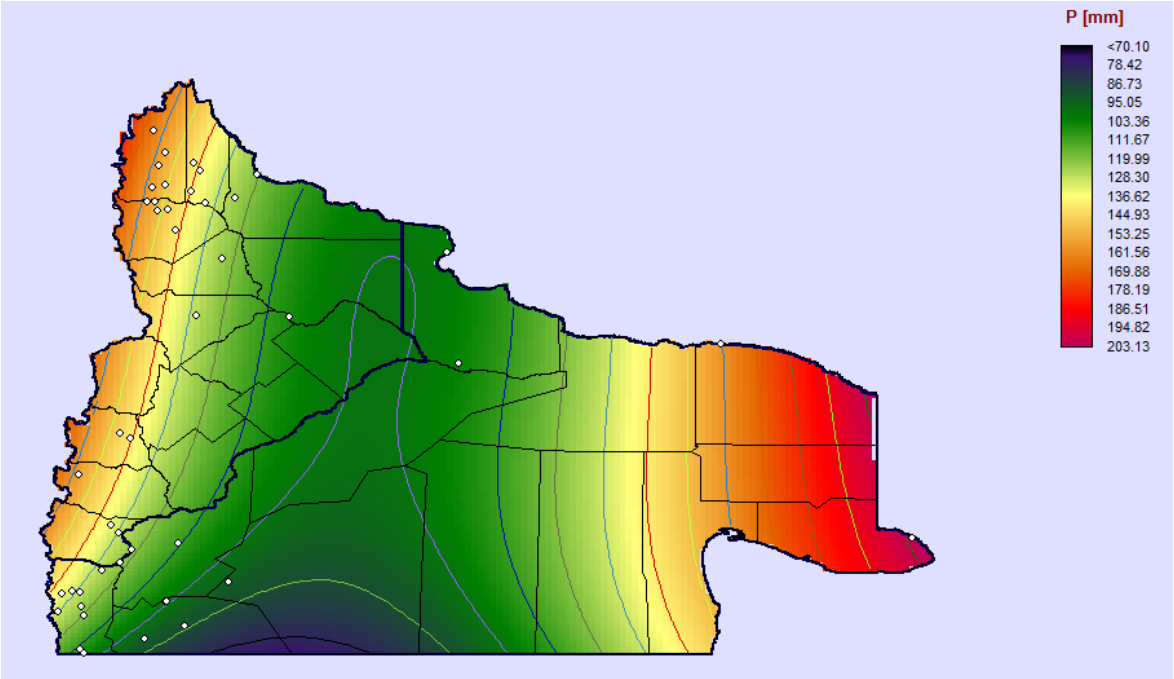


Figura 69: Mapa de lluvias diarias máximas anuales para las provincias de Neuquén y Rio Negro para un Periodo de retorno T= 100 años [mm].

Visualizando los mapas tendenciales generados se observa que en todos los casos las láminas de lluvia más altas se dan al Oeste de la provincia de Neuquén, y al Este de la provincia de Rio Negro. Los valores de lámina disminuyen a medida que nos desplazamos hacia el este de Neuquén y Oeste de Rio Negro; esto se relaciona con la existencia de un anticiclón que entra y descarga en la región cordillerana, asociado al fenómeno del niño.

7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

7.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo se divide en dos secciones. En primer lugar, se compara la información generada en el Capítulo 6 con los mapas de isohietas medias anuales existentes en las provincias de Neuquén y Rio Negro. En segundo lugar se realiza un contraste de la variación espacial de los mapas de lluvias máximas diarias generados hasta el día de la fecha en el marco del proyecto nacional dentro del cual este trabajo se inserta con un mapa nacional de precipitaciones medias totales anuales.

7.2. CONTRASTE ENTRE LOS MAPAS OBTENIDOS Y MAPAS DE ISOHIETAS MEDIAS ANUALES EXISTENTES EN LAS PROVINCIAS DE ESTUDIO

7.2.1. ANTECEDENTES

A continuación, (Figura 70 y Figura 71), se presentan los mapas de isohietas de precipitaciones medias anuales de las provincias de Neuquén y Rio Negro respectivamente. Además, dichos mapas cuentan también con información sobre las isotermas medias anuales y tipos de climas en la región.

Un mapa de isohietas está formado por líneas que unen puntos de igual cantidad de precipitación. Se debe tener en cuenta la variación de la precipitación con la altura y toda la información de las condiciones de la zona que se tenga acerca de la lluvia, como ser, morfología de tormentas, circulación de la atmosfera, entre otras. Para la generación de estos mapas de isohietas, lo primero que se hace es localizar las estaciones sobre un mapa. Luego, en cada estación se establece el valor de precipitación y se unen los puntos con igual precipitación en base a los valores registrados en las estaciones. Finalmente se dibujan las líneas de igual precipitación interpolando linealmente los valores de medición entre cada uno de los pares de estaciones.

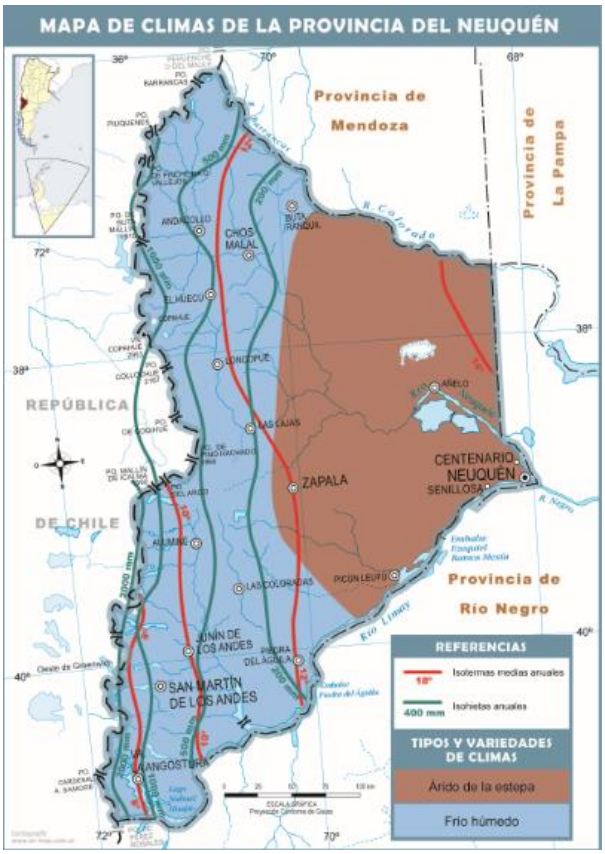


Figura 70: Mapa de isohietas de precipitaciones medias anuales de la provincia de Neuquén.

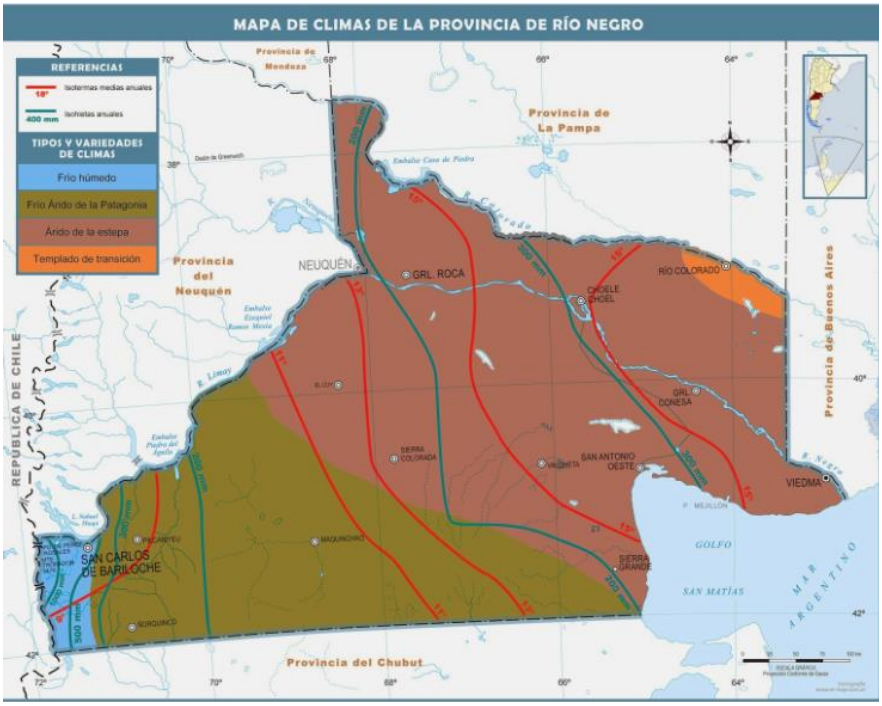


Figura 71: Mapa de isohietas de precipitaciones medias anuales de la provincia de Rio Negro.

En el caso de la provincia de Neuquén, se observa que el total disminuye de Oeste a Este. Siendo el valor máximo igual a 2000 mm en la zona de la cordillera de Neuquén, debido a que la misma hace de barrera evitando que las nubes sigan su camino. El valor mínimo se da en la cercanía a la capital siendo inferior a 200 mm.

Respecto a Rio Negro, se observa que los valores máximos se dan en el oeste de la provincia (valores del orden de 1000 mm), y luego decrecen hacia el centro de la misma (hasta alcanzar el valor mínimo del orden de 200 mm en el meridiano 68º). Luego la precipitación total anual vuelve a crecer hacia el este pero menos significativamente, hasta alcanzar valores superiores a los 300 mm en el borde este de la provincia.

7.2.2. COMPARACION ENTRE MAPAS OBTENIDOS EN ESTE TRABAJO Y MAPAS DE ISOHIETAS DE LAS PROVINCIAS DE ESTUDIO

A continuación se presentan los mapas de isohietas de lluvia diaria máxima siguiendo la metodología aplicada en este trabajo para los distintos periodos de retorno. En primer lugar se presenta el mapa de isohietas realizado en este trabajo a partir de la interpolación de Kriging (Figura 72) y el mapa obtenido luego de realizar la tendencia polinómica de tercer grado (Figura 73); ambos para una recurrencia ejemplo de 25 años:

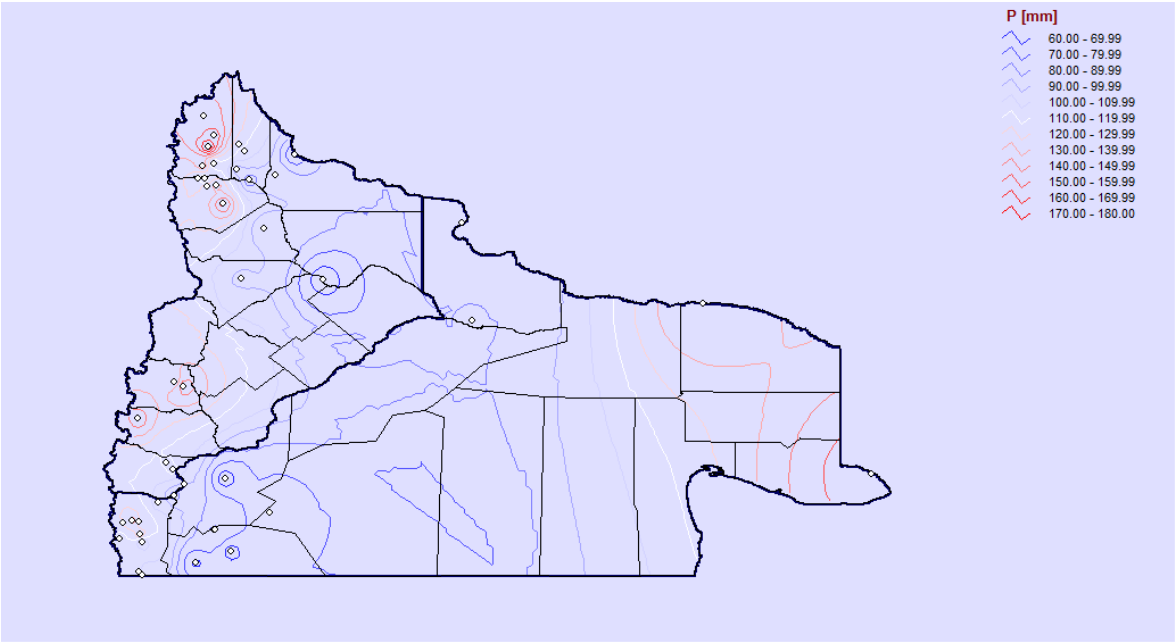


Figura 72: Mapa de isohietas de precipitaciones máximas diarias obtenidas por el método Kriging estimada para un período de retorno de 25 años

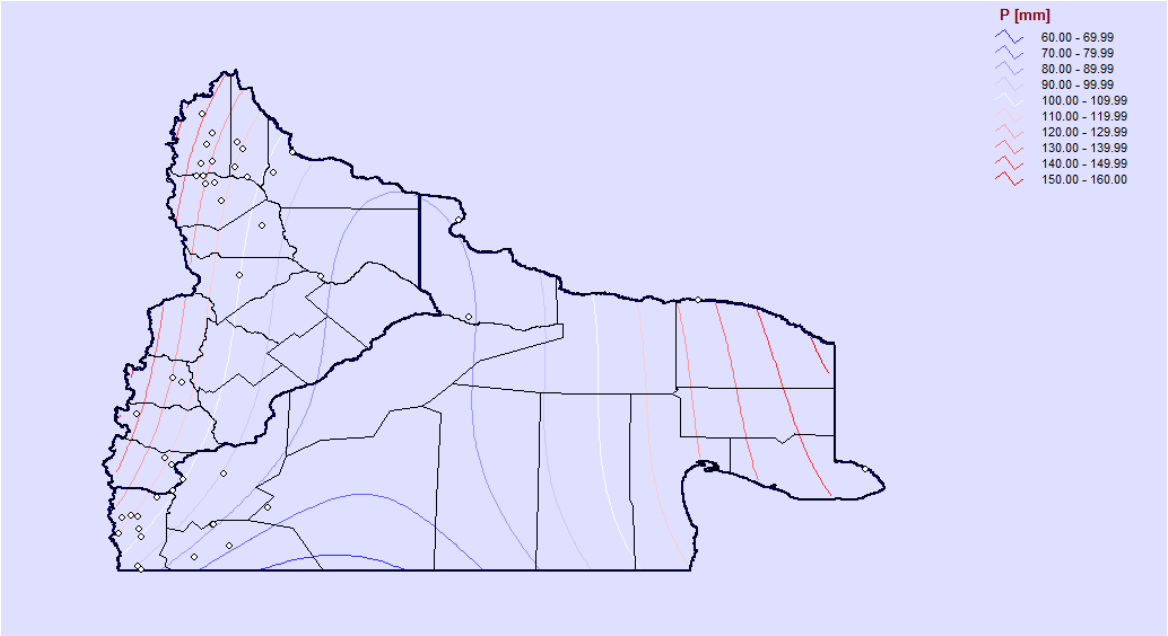


Figura 73: Mapa de isohietas de precipitaciones máximas diarias obtenidas por el ajuste de superficies tendenciales para un periodo de retorno de 25 años

En ambas figuras se observa que los valores de precipitación máximas diarias asociadas a una recurrencia de 25 años se dan en el oeste de la zona de estudio alcanzando un valor del orden de los 160 mm. Luego, las precipitaciones máximas decrecen hacia el este hasta alcanzar valores del orden de los 80 mm en el centro de Río Negro; y al ir moviéndose hacia el este luego las precipitaciones máximas vuelven a incrementarse hasta alcanzar un valor de 150 mm aproximadamente en el este de Río Negro.

Los máximos locales se presentan al Oeste y al Norte de la provincia de Neuquén, mientras que en Rio Negro no se presentan picos tan marcados pero los valores máximos también se registran al Oeste. La Figura 73 no incluye detalles locales por tratarse de una superficie tendencial.

De comparar estas últimas dos figuras con los mapas de isohietas de precipitaciones totales anuales presentados anteriormente, se concluye que si bien los mapas se lograron siguiendo metodologías diferentes y se realizaron partiendo de diferentes variables (en un caso precipitaciones medias anuales y en el otro precipitaciones máximas diarias asociadas a un T=25 años), los resultados finales no varían significativamente, obteniéndose una variación espacial similar; y esto valida el trabajo aquí realizado.

7.3. COMPARACIÓN DE MAPAS GENERADOS CON MAPA DE PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL

Tal como se anticipó en el capítulo 1, el presente trabajo forma parte de un proyecto nacional cuyo objetivo es estimar la lámina de lluvia máxima diaria asociada a diferentes recurrencias en todo el territorio de la Argentina.

Previamente a la realización de este trabajo, se habían analizado siguiendo la misma metodología que la aquí presentada las provincias de: Córdoba, San Luis, Santa Fe, Jujuy, Salta, Catamarca, Tucumán, Santiago del Estero, Chaco, Formosa, Entre Ríos y Corrientes. Durante el desarrollo de este trabajo no se acopló la información de Neuquén y Río Negro a las demás provincias previamente trabajadas, ya que la zona de estudio se encuentra separada de las demás provincias analizadas hasta el momento. En estos días, el grupo de trabajo se encuentra trabajando en las provincias de La Pampa y Mendoza; por lo que en el mediano plazo serán acopladas estas 4 ultimas provincias trabajadas al mapa nacional.

A pesar de no acoplarse Neuquén y Rio Negro al mapa nacional en este trabajo, a continuación se compararán dos series de mapas: los realizados en el capítulo 6 de este trabajo junto al de las demás provincias analizadas hasta el momento con el mapa de isohietas de lluvia total media anual en la República Argentina provisto por el INTA.

A continuación, en la Figura 74 se muestra el mapa de las provincias analizadas previamente a la realización de este trabajo para una recurrencia ejemplo de T=25 años, y en la Figura 75 se presenta el mapa de las provincias de Neuquén y Rio Negro asociado a la misma recurrencia:

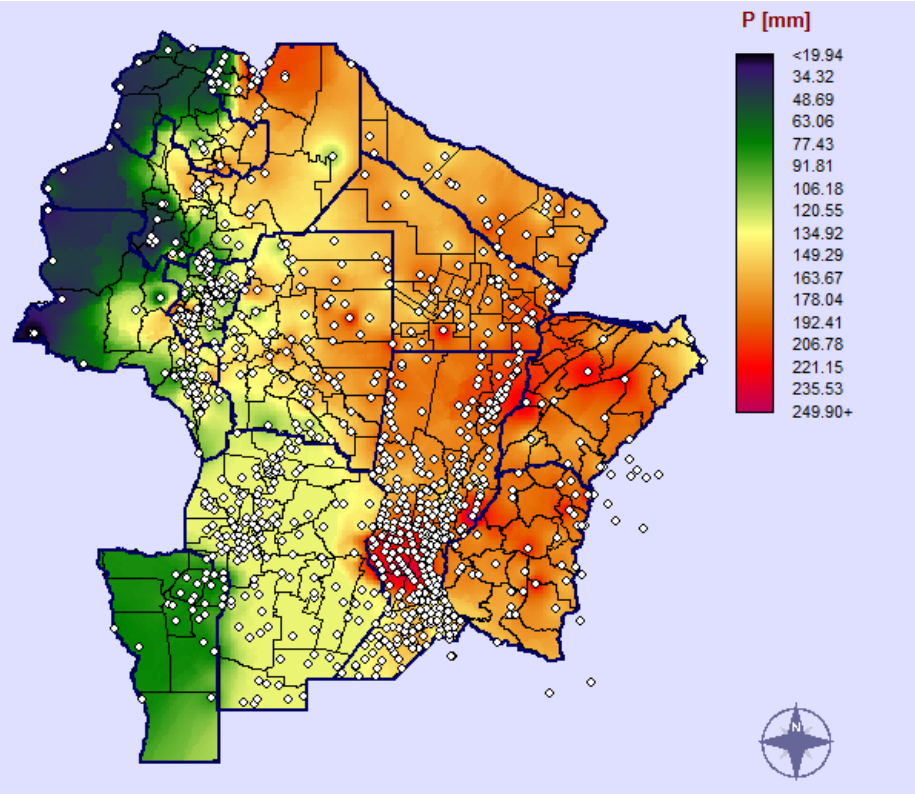


Figura 74: Mapa de lluvias diarias máximas anuales de las provincias analizadas previamente a la realización de este trabajo para un Periodo de retorno T= 25 años [mm]

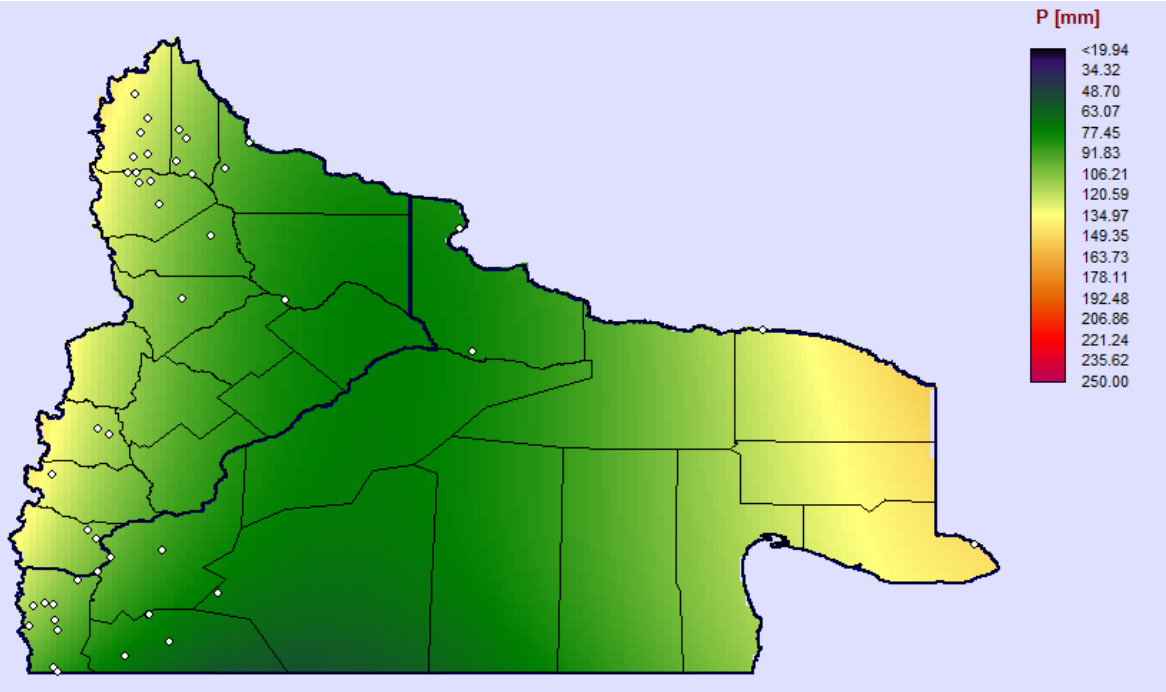


Figura 75: Mapa de lluvias diarias máximas anuales de las provincia de Neuquén y Rio Negro para un Periodo de retorno T= 25 años [mm]

De las últimas figuras se observa que los máximos valores de precipitación se dan hacia el Noreste de la República Argentina, y estos valores van disminuyendo a medida que nos acercamos a la cordillera, es decir hacia el Oeste del país.

Las provincias de Santa Fe, Misiones y Córdoba presentan una elevada densidad de Estaciones Meteorológicas, las cuales ayudan a estudiar con más precisión las cuestiones climáticas. Dado que se registran elevadas precipitaciones en dichas provincias es conveniente que se midan permanentemente las lluvias diarias, por ejemplo, logrando con la ayuda de herramientas computaciones un estudio más profundo del tema.

Respecto a la zona de análisis, observamos que hacia el Oeste es donde se registran las máximas precipitaciones, con una gran cantidad de estaciones en esa región.

Estudios realizados en las provincias citadas confirman que éstas características de las precipitaciones se deben a forzantes climáticos de variabilidad interanual producidas por el ENOS (El niño-Oscilación Sur) y por el anticiclón del Pacifico.

A continuación, en la Figura 76, se muestra el mapa de isohietas de lluvia total media anual en la República Argentina provisto por el INTA:

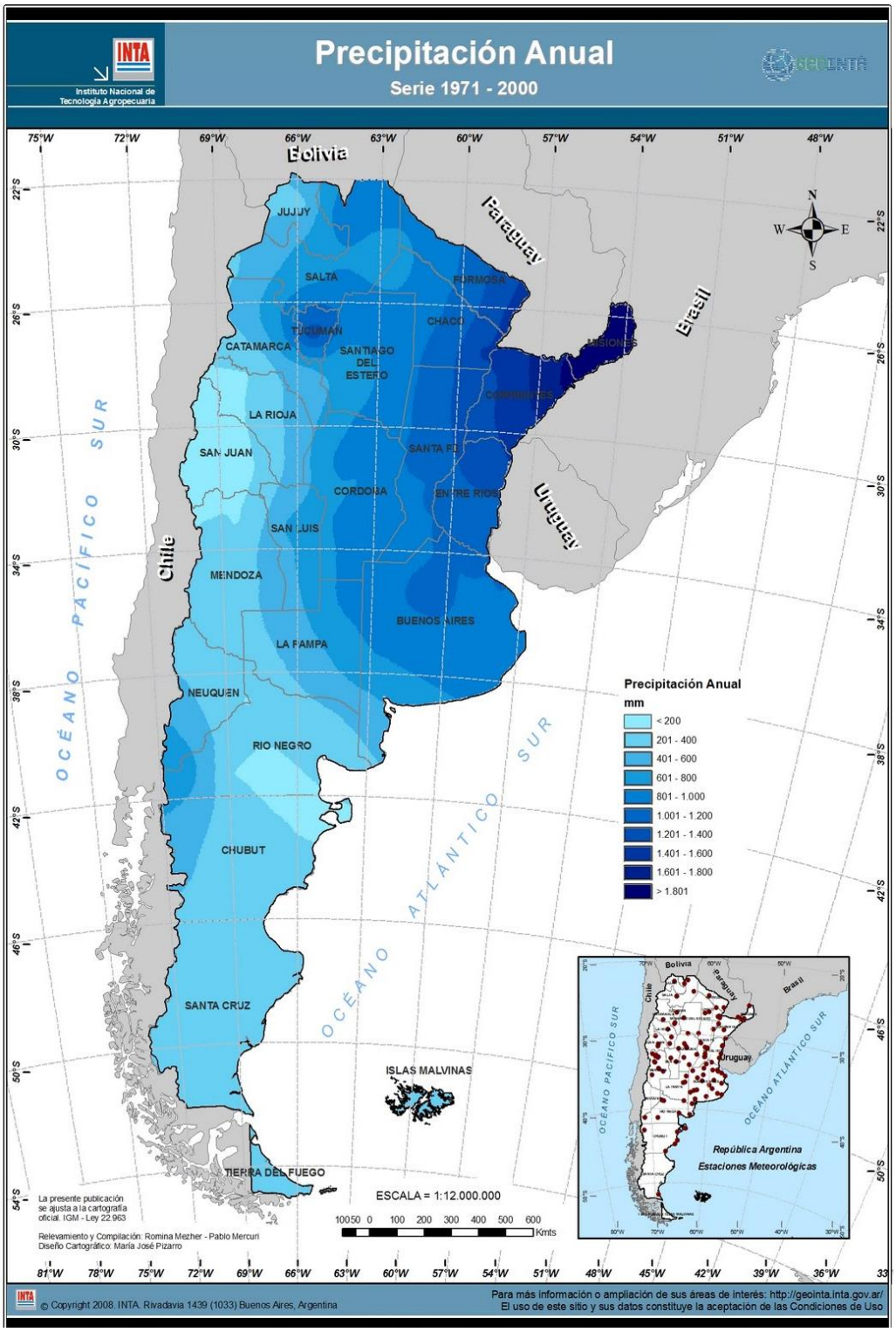


Figura 76: Lluvia media anual en la República Argentina (FUENTE: INTA).

Si bien dicha figura no muestra la misma variable que la analizada en este trabajo (sino una que está relacionada), a pesar de ello se observa el mismo patrón de precipitaciones: mayores valores de Oeste a Este en las provincias analizadas; valores altos de lámina precipitada (ya sea media anual o máximas diarias) en el Sur de Neuquén y Rio Negro en el límite con la cordillera, valores menores de lámina precipitada en el Este de Neuquén, en el Sur de Mendoza, La Pampa.

8. CONCLUSIONES.

8.1. CONCLUSIONES DEL TRABAJO.

A continuación se realiza una síntesis de los resultados obtenidos con respecto a los puntos enunciados en la sección 1.3. Los resultados se pueden resumir en los siguientes puntos:

1. Se recopilaron y procesaron registros de 59 estaciones pluviométricas en la región de estudio (Neuquén y Rio Negro).

2. Se ubicaron espacialmente las estaciones notando una ausencia de las mismas en la zona Este de la provincia de Neuquén y en gran parte de la provincia de Rio Negro, existiendo el mayor número de estaciones al Este de ambas provincias.

3. Se realizó una verificación exhaustiva de las hipótesis estadísticas para todas las estaciones encontradas, dando como resultado que los registros de al menos 49 estaciones verificaron estas pruebas.

4. De las 6 alternativas de función de distribución de probabilidad y de método de ajuste ensayado se adoptó la función LOGNORMAL con parámetros estimados por el método de máxima verosimilitud como representativo y se verificó que la incertidumbre debido al tamaño de las muestras utilizadas es más significativo que la incertidumbre debido al modelo probabilístico utilizado.

5. Se utilizó un Sistema de información Geográfico (SIG) para representar los resultados obtenidos. El programa utilizado fue IDRISI Selva 17.00.

6. Se realizó la interpolación espacial a través del método de Kriging, el cual evidenció la presencia de importantes fluctuaciones en el espacio.

7. Se crearon mapas de lluvias máximas diarias asociadas a diferentes períodos de retorno.

8. Al comparar los mapas obtenidos con este trabajo con antecedentes anteriores, se obtuvieron importantes conclusiones:

a) En el caso de la provincia de Neuquén, se observa que el total disminuye de Oeste a Este. Siendo el valor máximo igual a 2000 mm en la zona de la cordillera de Neuquén, debido a que la misma hace de barrera evitando que las nubes sigan su camino y descargan en la zona cordillerana. El valor mínimo se da en la cercanía a la capital siendo inferior a 200 mm. Se observa el mismo comportamiento en los mapas de isohietas recopilados.

b) Respecto a Rio Negro, se observa que los valores máximos se dan en el Oeste de la provincia (valores del orden de 1000 mm), y luego decrecen hacia el centro de la misma (hasta alcanzar el valor mínimo del orden de 200 mm en el meridiano 68º). Luego la precipitación total anual vuelve a crecer hacia el Este pero menos significativamente, hasta alcanzar valores superiores a los 300 mm en el borde Este de la provincia. Se observa que coincide con los mapas de isohietas recopilados.

c) Si ahora se analizan la provincia de Neuquén y Rio Negro y se construyen los mapas de precipitaciones máximas diarias asociadas a distintas recurrencias y se los compara con el mapa de isohietas de lluvia total media anual en la República Argentina provisto por el INTA, se puede ver que si bien en este último mapa no se muestra la misma variable que la analizada en este trabajo (sino una que está relacionada), se observa el mismo patrón de precipitaciones: mayores valores de Oeste a Este, valores altos de lámina precipitada (ya sea media anual o máximas diarias) al Oeste de la provincia de Neuquén y al Este de Rio Negro, valores menores de lámina precipitada en el Este de la Neuquén y al Oeste de Rio Negro.

d) Respecto al año hidrológico para el caso de las provincias de Neuquén y Rio Negro, se lo tomó distinto al de los trabajos anteriores, dado que en la región en cuestión se dan los valores máximos en los meses de invierno. Es decir se tomó como año hidrológico desde abril a octubre. La zona del Comahue presenta un régimen de lluvias invernales mientras que hacia el Este en la Patagonia las lluvias son escasas pero predominan en verano. La variabilidad interanual de las precipitaciones en el área total es muy grande y generalmente depende de forzantes climáticos de escala hemisférica como es la temperatura de la superficie del mar en los Océanos Pacífico, Atlántico e Indico y de los sistemas de onda de Rossby que se desplazan por el Pacífico y arriban a la cordillera de los Andes sur

donde la altura moderada de la misma, permite el acceso de los frentes y la humedad hacia Argentina. Como se sabe el año hidrológico en cada río comienza cuando se registra el mínimo caudal medio mensual. Entonces para las cuencas del Rio Limay, Neuquén y Rio Negro el año hidrológico comienza en el mes de Marzo mientras que para la Cuenca del Rio Colorado el ciclo hidrológico comienza en Abril.

8.2. CONCLUSIONES PERSONALES.

Como conclusión de este trabajo, las metas que fueron planteadas al comienzo del mismo se lograron alcanzar, ya sean personales como académicas, esto fue posible gracias a un ambiente de trabajo cómodo y cálido, en donde las ganas y la paciencia de los tutores por enseñar sus conocimientos, tanto personales como técnicos, fueron muy fuertes. Y por ello me gustaría agradecerles y mostrarles mi mayor respeto. A lo largo de proceso se fueron incorporando el uso de softwares que pueden ser útiles en la vida profesional, como ser HYFRAN e IDRISI Selva 17.00, que han sido de gran utilidad para la concreción de los objetivos establecidos. No quiero olvidarme de destacar la importancia de trabajar en equipo, ya que de no haberlo hecho hubiese sido un camino duro, es otra de las cosas que se aprenden y que en la futura vida profesional va a ser de gran ayuda.

8.3. TRABAJOS FUTUROS.

- Actualización de la información pluviométrica en la región de estudio, densificación de la red de estaciones disponibles e instalación de estaciones en las zonas donde hay ausencia de las mismas. Si bien la región del Comahue cuenta con una gran densificación de estaciones meteorológicas no todas registran precipitaciones.
- Cálculo de la lluvia máxima diaria en las provincias faltantes del país, caso del sur argentino donde, hasta el momento de este trabajo, no se ha extendido el mapeo.
- Aumentar las bases de datos de lluvias en todo el territorio nacional, siendo esto de gran importancia debido a que se pueden lograr herramientas que en la vida profesional de un ingeniero son muy importantes y necesarias.
- Generación de una plataforma para acceder desde la web a la información generada.

- Concientizar a las autoridades responsables de que la investigación es un motor para la creación de herramientas que pueden satisfacer las necesidades de la población actual y futura.
- Acoplar en el corto plazo la información de Neuquén y Río Negro a las demás provincias previamente trabajadas, ya que la zona de estudio se encuentra separada de las demás provincias analizadas hasta el momento. En estos días, el grupo de trabajo se encuentra trabajando en las provincias de La Pampa y Mendoza; por lo que en el mediano plazo serán acopladas estas 4 ultimas provincias trabajadas al mapa nacional.

9. REFERENCIAS.

- Aldonza, Juan (2016). "Regionalización de lluvias máximas diarias en las provincia de Entre Ríos". Practica Supervisada de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Bianchiotti, Bernabé (2012). "Análisis de la Precipitación Máxima Probable a través de un Sistema de Información Geográfica". Trabajo Final de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Córdoba.
- Bonaterra, Héctor (2016). "Regionalización de lluvias máximas diarias en las provincia de Corrientes". Practica Supervisada de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Caamaño Nelli, Gabriel; Dasso, Clarita (2003) "Lluvias de Diseño: Conceptos, Técnicas y Experiencias". CONICET. Universitas-Editorial Científica Universitaria. Córdoba, Argentina
- Caamaño Nelli, Gabriel; García Carlos Marcelo; Dasso Clarita (1998). "Zonalización de Tormentas de Diseño para la provincia de Córdoba, Argentina." II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur y XVII CNAgua, Tomo 2, 168-178. Santa Fe, Argentina.
- Calderoni Nahuel (2014). "Regionalización de lluvias máximas diarias en las provincias de Chaco y Formosa". Practica Supervisada de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Catalini, Carlos G.; Caamaño Nelli, Gabriel y Dasso, Clarita, compiladores (2011) "Desarrollo y Aplicaciones sobre Lluvias de Diseño en Argentina". 284 páginas. ISBN13: 978-3-8454-9722-8. Edit. Acad. Española (Lap Lambert Publishing GMBH & Co. KG). Saarbrüken, Deutschland.
- Chow, Ven T. (1959), Open-channel hydraulics: New York, McGraw-Hill, 680 p.
- García, Carlos Marcelo (1994). "Regionalización de Precipitaciones Máximas Diarias en la Provincia de Córdoba". Trabajo Final de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Córdoba. Córdoba, Argentina.
- Guillén, Nicolás Federico (2014). "Estudios avanzados para el diseño hidrológico e hidráulico de infraestructura hídrica" – Tesis de Maestría – Maestría en Ciencias de la Ingeniería – Mención recursos hídricos - Centro de Estudios y Tecnología del Agua
- Idrisi Selva – Versión 17.00. Clark Labs, Clark University. 950 Main Street, Worcester MA 01610-1477 USA

- Lérida, Gastón y Sánchez, Ezequiel (2011). "Estudio Metodológico para la determinación de una Grilla i-d-T consistente a nivel Provincial". Trabajo Final de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Córdoba.
- Maidah, Andrea Lorena (2010). "Análisis Espacial de Datos Hidrológicos utilizando Sistemas de Información Geográfica. Aplicación al estudio de Lluvias Diarias." Tesis de Grado de la carrera de Ingeniería Civil. Universidad Católica de Córdoba.
- Rühle, Federico G. O. (1966). "Determinación del Derrame Máximo Superficial de las Cuencas Imbríferas". La Ingeniería, Nº 987. Centro Argentino de Ingenieros. 2ª edición. Buenos Aires.
- Weibull, W. (1951), "A statistical distribution function of wide applicability", J. Appl. Mech.-Trans. ASME 18 (3): 293–297.
- Extractos de página web de la Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas (AIC).